

Глебов И.Т.

Обработка древесины резанием
Избранные статьи

Монография

Содержание

Введение	3
1. Резание одним лезвием	5
1.1. Затупление режущих кромок лезвий дереворежущего инструмента (Bluntness cutter plate of wood cutting tool)	5
1.2. Давление древесины на режущую кромку лезвия (Pressure of wood upon cutting edge of the edge)	10
1.3. Касательная сила резания при строгании кромок фанеры (The tangent force of cutting when planing edges of plywood)	17
2. Обработка древесины и древесных материалов на станках	25
2.1. Энергоёмкость нарезания чаш на брёвнах сруба дома (Power capacity of shaping log ends while house construction)	25
2.2. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от некоторых факторов цилиндрического фрезерования (Dependencies of Micro-roughness Height of Processed Surface on Some Factors of Cylinder Milling)	28
2.3. Толщина срезаемого слоя при фрезеровании и пилении древесных материалов (Thickness of the cut-off layer during the milling and division by a saw wood materials)	35
2.4. Расчет режимов фрезерования торцевой фрезой (Calculation of the modes of milling by a face mill)	43
2.5. Расчет мощности круглопильного раскряжевочного станка (Calculation of power of the round-saw log cutter)	52
3. Дереворежущий инструмент	62
3.1. Период стойкости круглых пил и использование его в расчетах (Period of circular saws and resistance use it in calculations)	62

3.2. Затупление зубьев дереворежущего инструмента (The blunting the wood-cutting teeth tool)	67
3.3. Проектирование сборной фрезы (Designing of the modular mill)	72
Заключение	77

Введение

Резание древесины – это наука, изучающая рациональные методы механической обработки деревянных заготовок на станках путем срезания стружек.

Знания об обработке древесины резанием накапливались с древних времен. К моменту отмены крепостного права в России (1861 г.) накопилось много фактов, надежных знаний о свойствах и качествах различных пород древесины, о дереворежущем инструменте и методах обработки резанием. Все это были **обыденные знания**, пока не научные.

Обработка древесины резанием нуждалась в развитии научных знаний. В отличие от обыденного знания наука не ограничивается нахождением новых фактов, а стремится объяснить их с помощью существующих гипотез, законов и теорий, либо специально вырабатывает для этого новые теоретические представления.

Фундамент науки строится на систематизации и организации знания, основывается на формировании новых понятий, законов и теорий. С помощью их удастся не только объяснить уже известные факты и явления, но и предсказать новые, неизвестные ранее факты и явления.

В структуре научного знания можно выделить два уровня: эмпирический и теоретический уровень.

Знания эмпирического уровня представляют собой результат непосредственного контакта с реальностью в наблюдении или эксперименте. Эмпирический уровень более связан с источником знания и в этом отношении более объективен.

Теоретический уровень представляет собой объяснение объективной реальности. Его главной задачей является описание, систематизация и объяснение всего множества данных эмпирического уровня. Эмпирический и теоретический уровни обладают определенной автономией, однако их невозможно

оторвать (отделить) один от другого. Можно утверждать, что над эмпирическим уровнем знания всегда надстраивается теоретический уровень.

Теоретический уровень отличается от эмпирического тем, что на нем происходит научное объяснение фактов, полученных на эмпирическом уровне. На этом уровне формируются конкретные научные теории.

Первая научно-исследовательская работа «Сопротивление металла и дерева резанию», была выполнена 1870 г. И.А. Тиме на Луганском заводе, которую он защитил в качестве диссертации для получения звания профессора Санкт-Петербургского горного института. В ней изложены результаты опытов по срезанию стружек и теория процесса резания. И.А. Тиме впервые дал определение процесса резания, привел классификацию стружек, логически объяснил явление усадки стружки (изменение размера в результате пластического деформирования), доказал, что толщина и ширина срезаемого слоя поразному влияют на работу резания. Это первая исследовательская работа, в которой результаты наблюдений не только описаны, но и логически объяснены. Так была выполнена первая научная работа по резанию металлов и дерева.

В современных условиях наука о резании древесины решает вопросы повышения производительности труда и качества обработанных деталей, повышения износостойкости режущего инструмента и создания расчетного метода для определения рациональных режимов резания, выявления рациональных режимов обработки новых материалов и др.

В предлагаемой работе приведены наиболее интересные статьи автора, развивающие науку о резании древесины. Статьи систематизированы по тематике.

1. Резание одним лезвием

1.1. Затупление режущих кромок лезвий деревоорежущего инструмента¹ (Bluntness cutter plate of wood cutting tool)

Деревообрабатывающий станок и его режущий инструмент принято рассматривать как элементы технологической системы. При эксплуатации технологической системы могут возникать отказы, неработоспособное состояние, когда значение хотя бы одного параметра или показателя качества изготавливаемой продукции, производительности, материальных и стоимостных затрат на изготовление продукции становятся несоответствующими требованиям, установленным в нормативно-технической или конструкторской, технологической документации.

В статье рассмотрено влияние режущего инструмента на параметрические отказы «Предельная энергоемкость обработки заготовки», «Точность» и «Шероховатость».

Мерой затупления режущих кромок лезвий принято считать величину их радиуса закругления, измеряемую в мкм. Острые кромки стального режущего инструмента имеют радиус закругления ρ , равный 4...6 мкм (для фрез) и 10 мкм (для пил).

Отказ технологической системы по показателю «Предельная энергоемкость обработки заготовки». При работе режущего инструмента лезвия затупляются, силы резания и мощность механизма главного движения станка увеличиваются. В некоторый момент времени затраты энергии на обработку заготовки могут превзойти предельно допустимую энергоемкость и наступит момент отказа.

¹ Глебов, И. Т. Затупление режущих кромок лезвий деревоорежущего инструмента = Bluntness cutter plate of wood cutting tool / И. Т. Глебов // Международный евразийский симпозиум «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». – Екатеринбург, 2008. – С. 169–172.

Влияние затупления лезвий при расчете сил и мощности резания учитывается коэффициентом затупления

$$\alpha_p = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_p}{\rho_o + 50},$$

где k – касательное давление срезаемого слоя на переднюю поверхность лезвия, МПа;

p – фиктивная сила резания, Н/мм;

ρ_o – радиус закругления режущей кромки лезвия, мкм;

Δ_p – величина затупления режущей кромки к моменту наступления отказа, мкм.

Отказ технологической системы по параметру «Точность». В процессе обработки деревянных заготовок лезвия режущего инструмента монотонно изнашиваются, затупляются, укорачиваются по биссектрисе угла лезвий (рис. 1).

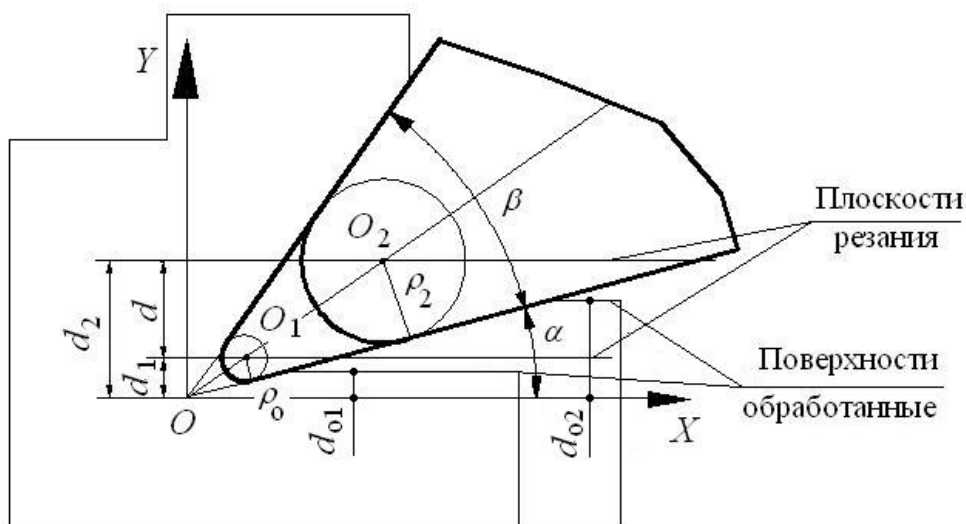


Рис. 1. Схема к расчету положения плоскости резания

Принято считать, что плоскость резания проходит через центр условно вписанной окружности с радиусом ρ в поверхность режущей кромки. Если острое лезвие имеет радиус закругления режущей кромки ρ_o , то плоскость ре-

зания расположена от оси абсцисс на расстоянии d_1 . Если лезвие, затупленное и имеет радиус закругления ρ_2 , то плоскость резания проходит выше на расстоянии от оси абсцисс d_2 . Обработанная поверхность древесины расположена ниже плоскости резания на величину остаточной деформации $\Delta_o = \rho \varepsilon_o$, где ε_o – величина относительной остаточной деформации. Таким образом, при обработке внешних поверхностей затупление лезвия приводит к увеличению размера, а при обработке внутренних поверхностей – к уменьшению размера.

Из рис. 1 найдем отрезок OO_1

$$OO_1 = \frac{\rho_o}{\sin(\beta/2)},$$

где β – угол заострения лезвия.

Ордината центра O_1

$$d_1 = \frac{\rho_o \sin(\alpha + \beta/2)}{\sin(\beta/2)}, \quad (1)$$

где α – задний угол лезвия.

Аналогично находится ордината центра O_2 :

$$d_2 = \frac{\rho_{\max} \sin(\alpha + \beta/2)}{\sin(\beta/2)}.$$

Обозначим через e выражение $e = \frac{\sin(\alpha + \beta/2)}{\sin(\beta/2)}$.

При увеличении радиуса закругления от ρ_o до ρ_2 обработанная поверхность поднимается от оси абсцисс на величину

$$d = (d_2 - \varepsilon_o \rho_2) - (d_1 - \varepsilon_o \rho_o) = \rho_2 (e - \varepsilon_o) - \rho_o (e - \varepsilon_o) \quad (2)$$

Отсюда получим значение предельно допустимого радиуса закругления режущей кромки, после достижения которого наступит отказ, неработоспособное состояние станка

$$\rho_2 = \frac{d}{e - \varepsilon_o} + \rho_o. \quad (3)$$

Для фрезерного режущего инструмента, например, по оси ординат расположен радиус фрезы. Можно сделать вывод, что для затупленного лезвия радиус фрезы уменьшается на величину $\Delta_r = d$.

Пример 1. Определить момент возникновения параметрического отказа при обработке проушин с номинальным размером 12; 14; 16 и основным отклонением Н13, если начальный радиус закругления режущей кромки $\rho_0 = 5$ мкм, задний угол лезвия $\alpha = 15^\circ$, угол заострения $\beta = 40^\circ$, поле рассеяния размеров на станке $\omega = 180$ мкм, относительная остаточная деформация $\epsilon_0 = 0,2$.

Решение. 1. По ГОСТ 6449.1-82 [2] находим поле допуска IT13 = 270 мкм.

2. Находим величину запаса поля допуска

$$\delta_3 = IT13 - \omega = 270 - 180 = 90 \text{ мкм.}$$

3. Принимаем величину подъема обработанной поверхности для одной режущей кромки лезвия $d = \delta_3 / 2 = 90 / 2 = 45$ мкм.

4. Определим значение выражения

$$e = \frac{\sin(\alpha + \beta / 2)}{\sin(\beta / 2)} = \frac{\sin(15 + 40 / 2)}{\sin(40 / 2)} = 1,677.$$

5. Находим предельно допустимый радиус закругления режущей кромки

$$\rho_{\max} = \frac{d}{e - \epsilon_0} + \rho_0 = \frac{45}{1,677 - 0,2} + 5 = 35,5 \text{ мкм.}$$

Анализ формулы (3) показывает, что с увеличением угла заострения лезвия предельное значение радиуса закругления ρ_{\max} увеличивается:

Угол β°	40	45	50	55
Радиус закругления ρ_2 , мкм	35,5	37,36	39,1	40,6

Для проушин с номинальным размером по ширине 6; 8; 10 мм поле допуска равно 220 мкм; при прочих равных условиях значение ρ_2 изменяется так:

Угол β°	40	45	50	55
Радиус закругления ρ_2 , мкм	18,54	19,38	20,1	20,8

Пример 2. Определить момент возникновения параметрического отказа при обработке на сверлильно-пазовальном станке гнезд под шипы размером 8Н13, если $\rho_0 = 5$ мкм, $\alpha = 15^\circ$, $\beta = 40^\circ$, поле рассеяния размеров на станке $\omega = 180$ мкм.

Решение. Гнездо обрабатывается концевой фрезой. При затуплении режущих кромок диаметр фрезы убывает. Поле допуска на размер 0,22 мм. По формуле (3) получаем, что отказ наступит в момент, когда $\rho_2 = 18,54$ мкм.

Из изложенного выше следует, что на момент возникновения параметрического отказа по параметру точности влияет главным образом точностное состояние станка. Чем больше значение поля рассеяния размера, тем меньше запас поля допуска и тем скорее наступает отказ. Применение формулы (3) позволяет определить расчетным путем предельно допустимое значение радиуса закругления лезвия, по достижению которого происходит отказ станка.

Отказ технологической системы по параметру «Шероховатость». Затупление режущих кромок лезвий приводит к увеличению шероховатости обработанной поверхности. Изменение шероховатости фрезерованной поверхности по данным исследований Комарова Г.А. и Кряжева Н.А. приведено в таблице 1.

Шероховатость поверхности при изменении радиуса закругления до 40 мкм при продольном фрезеровании, мкм.

Таблица 1 – Изменение шероховатости фрезерованной поверхности

Автор	Порода	Скорость резания, м/с	Подача на зуб, мм	Уравнение зависимости
Комаров Г.А., фрезерование поперечное	Сосна	20	1,6	$R_{m \max}=350+75\rho$
			0,4	$R_{m \max}=210+10,25\rho$
	Береза		1,6	$R_{m \max}=190+2,625\rho$
			0,4	$R_{m \max}=90+2,625\rho$
Кряжев Н.А., Фрезерование продольное	Сосна, береза	—	1,25...5,0	$R_{m \max}=10+\rho$

При продольном фрезеровании изменение шероховатости соизмеримо с изменением радиуса закругления.

1.2. Давление древесины на режущую кромку лезвия² (Pressure of wood upon cutting edge of the edge)

Давление древесины на режущие кромки лезвий, возникающее в процессе резания древесины, влияет на износ и затупление режущих инструментов. При этом в теории резания древесины до сих пор нет четких методик для определения указанных давлений, что затрудняет правильное объяснение процесса резания и назначение рациональных режимов обработки древесины. По мнению А.Л. Бершадского, например, давление на режущую кромку можно определить по формуле:³

$$k_{\mu} = 8\rho + k,$$

² Глебов, И. Т. Давление древесины на режущую кромку лезвия = Pressure of wood upon cutting edge of the edge / И. Т. Глебов, В.В. Глебов // Международный евразийский симпозиум: «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». – Екатеринбург, 2013. – С. 179–182.

³ Бершадский А.Л. Расчет режимов резания древесины/ А.Л. Бершадский. – М.: Лесн. пром-сть, 1967. – 175 с.

ней части срезаемого слоя 1236. Максимальную толщину микрослоя в срезаемом макрослое принимают равной 0,1 мм. Касательное давление в микрослое обозначим k_μ , а во внешнем слое – k .

Если форму слоев эпюры принять за параллелограммы, то единичную силу F_{xn} для срезаемого макрослоя ($a \geq 0,1$ мм) можно найти как сумму площадей слоев эпюры по следующему выражению:³

$$F_{xn} = 0,1k_\mu + k(a - 0,1), \quad (1)$$

где k_μ , k – касательное давление на передней поверхности, МПа;

a – толщина срезаемого слоя, мм;

0,1 – граничное значение толщины срезаемого слоя между микрослоем и макрослоем, мм.

Если толщина срезаемого слоя $a_\mu < 0,1$ мм (микрослой), то

$$F_{xn} = a_\mu k_\mu \quad (2)$$

Многочисленными экспериментальными исследованиями доказано, что единичная касательная сила резания изменяется по параболической кривой в диапазоне микрослоев и по линейной в диапазоне макрослоев.

Общее уравнение параболы в осях координат F_{x1} и a (рис. 2)

$$F_{x1} = ca^2 + da + e, \quad (3)$$

где c , d , e – параметры параболы.

Вершина параболы расположена в точке $A(0,1; F_{x0,1})$, заданной координатами $a = 0,1$ и $F_{x1} = F_{x0,1}$ (значение силы резания при толщине срезаемого слоя $a = 0,1$ мм). Взяв первую производную функции (3) по a , и приравняв ее нулю, найдем абсциссу,

$$a = 0G = 0,1 = -\frac{d}{2c}. \quad (4)$$

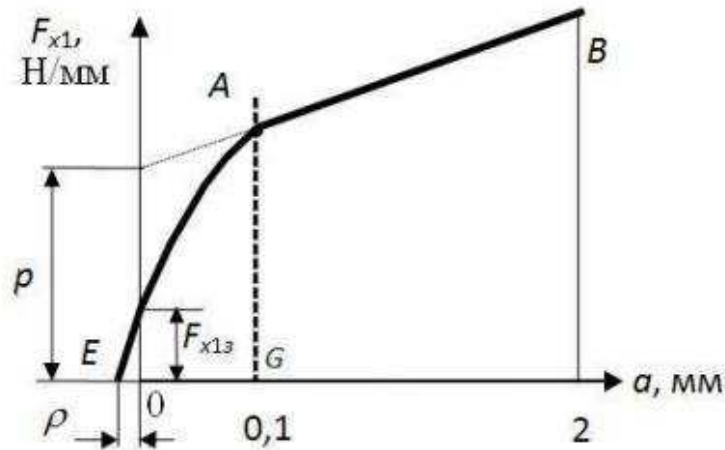


Рис. 2. Зависимость касательной силы резания
от толщины срезаемого слоя

Подставив значение a в уравнение (3), найдем ординату вершины параболы.

$$AG=F_{x0,1}=\frac{4ce-d^2}{4c}. \quad (5)$$

где $F_{x0,1}$ – значение касательной силы резания при толщине срезаемого слоя

$$0,1 \text{ MM: } F_{x0,1} = p + 0,1k .$$

Парабола проходит через точку E , с координатами:

$$aE = -\rho_o;$$

$$F_{x0,1E} = 0.$$

Подставляя эти координаты в уравнение параболы, получим

$$\begin{aligned} 0 &= c\rho_o^2 - d\rho_o + e, \\ e &= -c\rho_o^2 + d\rho_o. \end{aligned} \quad (6)$$

Для определения параметров c, d, e параболы решим уравнения (4), (5) и (6) как систему уравнений.

После решения системы уравнений получим параметры параболы:

$$c = -\frac{F_{x0,1}}{\lambda}; \quad d = \frac{0,2F_{x0,1}}{\lambda}; \quad e = F_{x0,1}(1 - \frac{0,01}{\lambda}), \quad (7)$$

где λ – коэффициент: $\lambda = \rho_o^2 + 0,2\rho_o + 0,01$; где ρ_o – начальный радиус закругления режущей кромки, мм.

Уравнение единичной касательной силы резания для микрослоев по уравнению (3)

$$F_{x1} = (p + 0,1k)(1 - \frac{1}{\lambda}a^2 + \frac{0,2}{\lambda}a - \frac{0,01}{\lambda}). \quad (8)$$

Найдем единичную силу резания по задней поверхности лезвия. При $a = 0$ парабола пересекает ось ординат в точке, соответствующей значению силы резания по задней поверхности лезвия. Таким образом, для острого лезвия

$$F_{x3} = (p + 0,1k)(1 - \frac{0,01}{\lambda})$$

или

$$F_{x3} = (p + 0,1k)(1 - \frac{0,01}{\rho_o^2 + 0,2\rho_o + 0,01}). \quad (9)$$

Пренебрегая значением ρ_o^2 в виду его малости, упрощая выражение и переходя к размерности ρ в мкм, получим формулу для расчета единичной касательной силы резания по задней поверхности острого лезвия:

$$F_{x13} = (p + 0,1k)(\frac{\rho_o}{\rho_o + 50}). \quad (10)$$

Для затупленного лезвия

$$F_{x3T} = (\alpha_\rho p + 0,1k)(\frac{\rho_o + \Delta_\rho}{\rho_o + \Delta_\rho + 50}), \quad (11)$$

где Δ_ρ – величина затупления режущей кромки, мкм;

α_ρ – коэффициент затупления.

$$\alpha_\rho = 1 + (1 + 0,1\frac{k}{p})\frac{\Delta_\rho}{\rho_o + 50}. \quad (12)$$

Касательная сила резания на лезвии складывается из двух сил: сил действующих по передней и задней поверхности:

$$F_{x0,1} = F_{xn} + F_{xz}. \quad (13)$$

В общем виде для макрослоев ($a \geq 0,1$ мм)

$$F_x = p + ka, \quad (14)$$

где p – фиктивная сила резания, Н/мм;

k – касательное давление макро срезаемого слоя на переднюю поверхность лезвия, МПа.

Подставляя в выражение (13) его составляющие (14), (10) в (1) для острого лезвия получим:

$$p + ka = (p + 0,1k)\left(\frac{\rho_o}{\rho_o + 50}\right) + 0,1k\mu + k(a - 0,1).$$

После преобразования найдем величину давления на режущую кромку лезвия в диапазоне срезаемых микрослоев древесины, МПа:

– для острого лезвия

$$k_\mu = 10(p + 0,1k)\left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_o + 50}\right); \quad (15)$$

– для тупого лезвия

$$k_\mu = 10(\alpha_\rho p + 0,1k)\left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_o + 50}\right). \quad (16)$$

Пример 1. Дано. Выполняется пиление древесины березы пилой с острыми зубьями; величина касательной силы резания изменяется по уравнению $F_{x1} = 6,72 + 17,58a$. Определить давление на режущей кромке.

Решение. Для начального радиуса закругления $\rho_o = 10$ мкм (зубья пилы)

$$k_\mu = 10(p + 0,1k)\left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_o + 50}\right) = 10(6,72 + 0,1 \cdot 17,58)\left(1 - \frac{10}{10 + 50}\right) = 70,4 \text{ МПа.}$$

$$k_\mu = 8,3(p + 0,1k).$$

Пример 2. Дано. Выполняется фрезерование древесины березы фрезой с острыми зубьями; величина касательной силы резания изменяется по уравнению $F_{x1} = 4 + 38a$. Определить давление на режущей кромке.

Решение. Для начального радиуса закругления зубьев фрезы $\rho_o = 5$ мкм

$$k_{\mu} = 10(p + 0,1k)(1 - \frac{\rho_o}{\rho_o + 50}) = 10(4 + 0,1 \cdot 38)(1 - \frac{5}{5 + 50}) = 71 \text{ МПа.}$$

$$k_{\mu} = 9,1(p + 0,1k).$$

Пример 3. Дано. Выполняется пиление древесины березы пилой с затупленными зубьями, величина затупления $\Delta_{\rho} = 20$ мкм, начальный радиус закругления зубьев $\rho_o = 10$ мкм. Величина касательной силы резания изменяется по уравнению $F_{x1} = 6,72 + 17,58a$. Определить давление на режущей кромке.

Решение. 1. Находим значение коэффициента затупления

$$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_{\rho}}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{17,58}{6,72}) \frac{20}{10 + 50} = 1,42.$$

2. Давление на режущей кромке

$$\begin{aligned} k_{\mu} &= 10(\alpha_{\rho} p + 0,1k)(1 - \frac{\rho_o}{\rho_o + 50}) = \\ &= 10(1,42 \cdot 6,72 + 0,1 \cdot 17,58)(1 - \frac{10}{10 + 50}) = 56,5 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Выводы.

При лезвийном резании древесины на режущей кромке наблюдается концентрация напряжений, направленных параллельно вектору скорости главного движения. Величина напряжений на режущей кромке достигает 56...70 МПа и превышает напряжения, действующие по передней грани, более чем в 3...4 раза.

Величина давления на режущей кромке лезвия зависит от величины фиктивной силы резания p , касательного давления срезаемого слоя на переднюю поверхность лезвия k и величины радиуса закругления режущей кромки ρ . Для тупых лезвий напряжения на режущей кромке меньше, чем для острых.

1.3. Касательная сила резания при строгании кромок фанеры ⁴ (The tangent force of cutting when planning edges of plywood)

Фанера – древесный материал, состоящий из нескольких склеенных листов лущёного шпона при взаимно перпендикулярном расположении волокон древесины в смежных листах. Фанера широко используется в строительстве, машино- и судостроении, домостроении, производстве мебели. При механической обработке кромки листов фанеры формируют пилением, фрезерованием, строганием, шлифованием. Однако в теории резания древесины отсутствуют сведения о режимах обработки кромок фанеры.

Целью настоящей работы является определение зависимости касательной силы резания от толщины срезаемого слоя при строгании кромок фанеры общего назначения на базе проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

Известно, что для массивной древесины единичная касательная сила резания в зависимости от толщины срезаемого слоя описывается двумя уравнениями: уравнением параболы в диапазоне микро срезаемых слоев и уравнением прямой линии в диапазоне срезаемых слоев $a=0,1 \dots 2,0$ мм:

– для микрослоев

$$F_{x1} = (p + 0,1k)(1 - \frac{1}{\lambda}a^2 + \frac{0,2}{\lambda}a - \frac{0,01}{\lambda}); \quad (1)$$

– для макрослоев

$$F_{x1} = \alpha_p p + ka, \quad (2)$$

⁴ Глебов, И. Т. Касательная сила резания при строгании кромок фанеры = The tangent force of cutting when planning edges of plywood / И. Т. Глебов, В.В. Глебов // М.: Издательство Московского государственного университета леса, 2013. – №3. – С. 122-125.

где F_{x1} – единичная касательная сила резания, Н/мм;

p – фиктивная сила резания, Н/мм;

k – касательное давление срезаемого слоя на переднюю грань зуба, МПа;

a – толщина срезаемого слоя, мм;

α_p – коэффициент затупления режущей кромки зуба;

λ – коэффициент, мм²; $\lambda = \rho_o^2 + 0,2\rho_o + 0,01$; где ρ_o – начальный радиус закругления режущей кромки, мм.

При расчете режимов резания массивной древесины используют метод А.Л. Бершадского, основанный на «Общем законе резания древесины», в котором принято несколько допущений, один из которых заключается в том, что граничное значение между микро- и макро срезаемыми слоями равно $a_0 = 0,1$ мм. Теоретическое обоснование этого значения нам не известно, хотя принято во многих экспериментальных исследованиях.

В статье сделан вывод математической модели касательной силы резания при строгании кромок фанеры в зависимости от срезаемых слоев и получено обоснованное значение граничного значения a_0 .

Вывод расчетной формулы для микро срезаемых слоев. В диапазоне микрослоев ($0 \leq a \leq a_0$ мм) линия зависимости единичной касательной силы резания от толщины срезаемого слоя имеет параболическую форму (рис. 1). Общее уравнение параболы АЕ в осях координат F_{x1} и a

$$F_{x1} = ca^2 + da + e, \quad (3)$$

где c, d, e – параметры параболы.

Взяв первую производную функции (3) по a , и приравняв ее нулю, найдем абсциссу, а затем и ординату вершины параболы. Парабола проходит через точку E , и вершина ее расположена в точке A .

Координаты точки A :

$$aA = 0G = a_0 = -\frac{d}{2c}; \quad (4)$$

$$F_{x1A} = AG = F_{xa_0} = \frac{4ce - d^2}{4c}, \quad (5)$$

где F_{xa_0} – значение касательной силы резания при толщине срезаемого слоя a_0 мм: $F_{xa_0} = \alpha_\rho p + a_0 k$ (расчет по уравнению прямой линии АВ), где α_ρ коэффициент затупления режущей кромки лезвия.

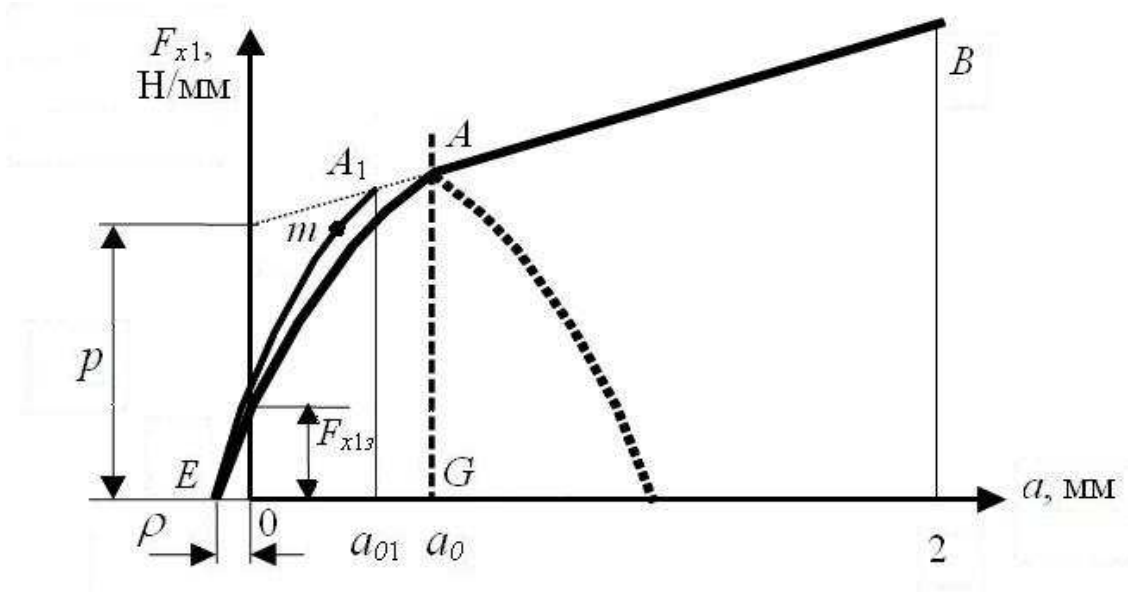


Рис. 1. Расчетная схема к определению касательной силы резания для микрослоев

Отсюда получим

$$d = -2ca_0, \quad (6)$$

$$4cF_{xa_0} = 4ce - d^2. \quad (7)$$

Точка E , лежащая на параболе, имеет координаты:

$$a_E = -\rho;$$

$$F_{x1E} = 0. \quad (8)$$

Подставляя эти координаты в уравнение параболы (1), получим

$$0 = c\rho^2 - d\rho + e,$$

$$e = -c\rho^2 + d\rho. \quad (9)$$

Получена система уравнений для определения параметров c , d , e параболы:

$$\begin{cases} d = -2ca_0; \\ 4cF_{xa_0} = 4ce - d^2; \\ e = -c\rho^2 + d\rho. \end{cases} \quad (10)$$

После решения системы уравнений получено

$$c = -\frac{F_{xa_0}}{\lambda}; \quad d = \frac{2a_0F_{xa_0}}{\lambda}; \quad e = F_{xa_0}\left(1 - \frac{a_0^2}{\lambda}\right), \quad (11)$$

где λ – коэффициент, мм²: $\lambda = \rho^2 + 2a_0\rho + a_0^2$; где ρ – радиус закругления режущей кромки, мм.

Уравнение единичной касательной силы резания для микрослоев (по уравнению 3)

$$F_{x1} = (\alpha_\rho p + a_0 k) \left(1 - \frac{1}{\lambda} a^2 + \frac{2a_0}{\lambda} a - \frac{a_0^2}{\lambda}\right). \quad (12)$$

Сила резания по задней поверхности лезвия. При $a = 0$ парабола пересекает ось ординат в точке, соответствующей значению силы резания по задней поверхности лезвия. Таким образом, для лезвия

$$F_{xz} = (\alpha_\rho p + a_0 k) \left(1 - \frac{a_0^2}{\lambda}\right). \quad (13)$$

Определение граничного значения a_0 . За базовое граничное значение можно принять $a_0 = 0,1$ мм. Однако, в результате экспериментальных исследований может быть получена точка m , лежащая на графике (рис. 1) выше кривой параболы AE . Если вертикальную ось параболы AG сместить влево, то можно добиться, что линия параболы пройдет через точку m . В этом случае граничное значение будет равно $a_0 = a_{01}$.

Результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проведены в лаборатории кафедры станков и инструментов УГЛТУ на станке, используемом для изучения процесса строгания. Образцы

фанеры размером 100×50×6 (9) мм фиксировались на тензометрическом динамометре и перемещались подвижным суппортом относительно неподвижного ножа.

Условия опытов. Скорость главного движения (скорость перемещения суппорта) $V = 0,035$ м/с, угол резания ножа $\delta = 55^\circ$, толщина срезаемого слоя $a = 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25, 0,30$ мм. Ширина строгания $b = 6$ мм (плотность фанеры $\rho = 0,77$ г/см³) и $b = 9$ мм (плотность фанеры $\rho = 0,708$ г/см³). Радиус закругления режущей кромки ножа $\rho_0 = 12$ мкм.

Для записи и обработки данных была выбрана аппаратно-программная среда LabView, которая преобразует аналоговый сигнал в цифровой и позволяет создавать, хранить и обрабатывать базы данных на компьютере.

Результаты экспериментов в виде графиков представлены на рис. 2 и 3.

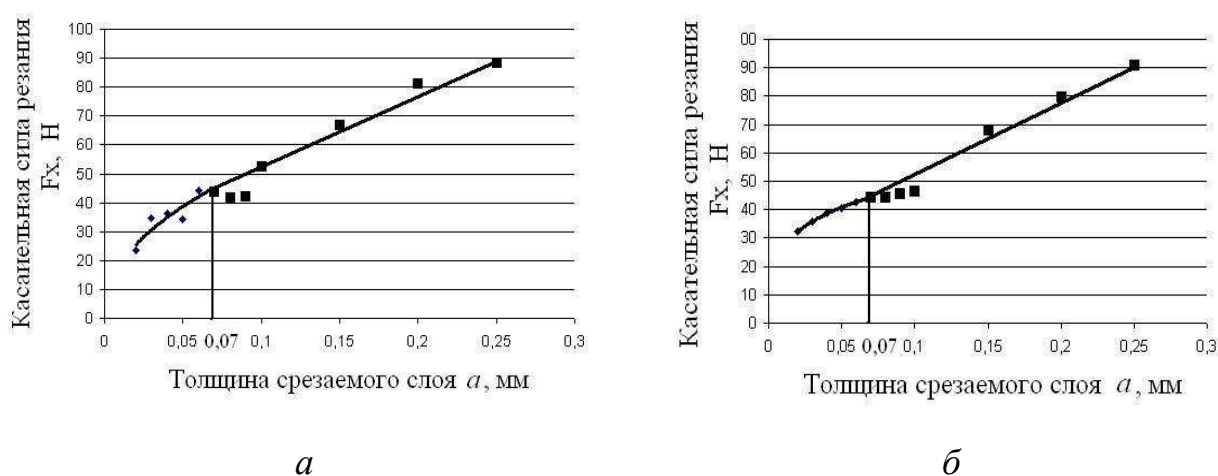


Рис. 2. Зависимость касательной силы резания от толщины срезаемого слоя при строгании кромок фанеры толщиной 6 мм:

a – для продольных кромок; b – для поперечных кромок

Кромки в зависимости от направления волокон древесины лицевого слоя фанеры назовем продольными, они параллельны направлению волокон,

или поперечными, они перпендикулярны направлению волокон древесины. Кромка образуется перерезанием продольных и поперечных слоев фанеры. Если кромка продольная, то количество продольных слоев, образующих ее, на единицу больше, чем поперечных слоев. И, наоборот, в поперечной кромке количество поперечных слоев на единицу больше, чем продольных слоев. При этом при строгании продольных слоев осуществляется резание вдоль волокон, а при строгании поперечных слоев – резание в торец. В результате этого сила резания при строгании поперечных кромок должна быть несколько больше, чем при строгании продольных кромок. Отсюда следует, что сила резания не может быть прямо пропорциональна ширине срезаемого слоя.

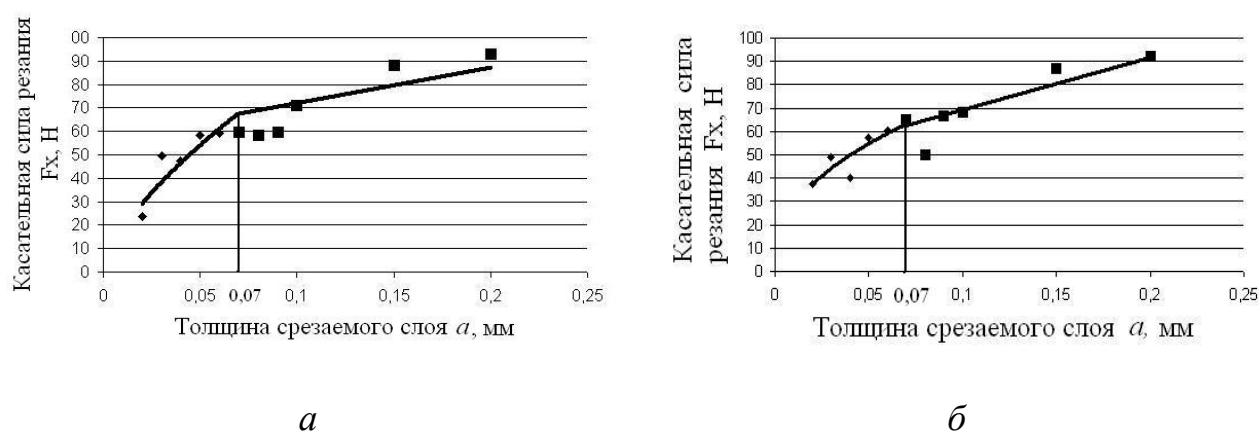


Рис. 3. Зависимость касательной силы резания от толщины срезаемого слоя при строгании кромок фанеры толщиной 9 мм:
 а – для продольных кромок; б – для поперечных кромок

Графики показывают, что граничной абсциссой между кривой линией в диапазоне срезаемых микро слоев и прямой линией в диапазоне срезаемых макро слоев является абсцисса $a_0 = 0,07$ мм. Характеристика линий графиков приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристика линий графиков

Толщина срезаемого слоя a , мм	Уравнение линий при строгании кромки		Достоверность аппроксимации R^2	
	продольных	поперечных	продоль- ных	попереч- ных
$b = 6$ мм				
$a \leq 0,07$	$F_x = 152,67a^{0,4587}$	$F_x = 87,215a^{0,2542}$	0,8481	0,9969
$a \geq 0,07$	$F_x = 28 + 243,9a$	$F_x = 27 + 252,39a$	0,949	0,9674
$b = 9$ мм				
$a \leq 0,07$	$F_x = 408,91a^{0,676}$	$F_x = 194,71a^{0,424}$	0,7913	0,7642
$a \geq 0,07$	$F_x = 57 + 150,45a$	$F_x = 47 + 222,33a$	0,6611	0,7731

Если принять, что при строгании фанеры граничной абсциссой является $a_0 = 0,07$ мм, а сила резания не прямо пропорциональна ширине срезаемого слоя, то расчетное уравнение касательной силы резания для срезаемых микро слоев по (12) можно написать так, Н/мм:

$$F_x = (\alpha_p p + 0,07k) \left(1 - \frac{1}{\lambda} a^2 + \frac{0,14}{\lambda} a - \frac{0,07^2}{\lambda} \right), \quad (14)$$

где $\lambda = \rho^2 + 2a_0\rho + a_0^2$; при $\rho = 0,012$ мм и $a_0 = 0,07$ мм; $\lambda = 0,006724$.

В этом уравнении значения p и k принимаются для толщины b мм, а не 1 мм.

Выполним расчеты касательной силы резания F_x для условия строгания поперечных кромок фанеры толщиной 6 мм в диапазоне срезаемых микро слоев

ев, используя экспериментальные значения $p = 27$ Н/мм; $k = 252,39$ МПа. Тогда по формуле (14) получим данные, которые в сравнении с экспериментальными данными приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Данные для анализа расчетных и экспериментальных данных касательной силы резания при строгании поперечных кромок фанеры

a , мм	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07
F_x , Н, расчетное	34,0	38,7	42,0	44,0	44,7
F_x , Н, эксперим.	35,58	38,6	40,35	42,52	44,59
Погрешность, %	4,3	0,3	-4,1	-3,3	-0,2

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. В фанере можно выделить продольные слои (в них осуществляется при строгании резание вдоль волокон) и поперечные слои (в них осуществляется резание в торец).

2. Результаты экспериментальных исследований показывают, что граничной абсциссой, разделяющей при строгании кромок фанеры срезаемые микро слои и макро слои является $a_0 = 0,07$ мм. В диапазоне микро слоев зависимость касательной силы резания от толщины срезаемого слоя криволинейная, параболическая, в диапазоне макро слоев – прямолинейная.

3. На основании теоретических исследований предложено уравнение (12) для расчета касательной силы резания в диапазоне срезаемых микро слоев. Сопоставительный анализ расчетных и экспериментальных данных показал хорошие результаты. Предлагаемая расчетная формула (12) может быть рекомендована для решения практических задач.

2. Обработка древесины и древесных материалов на станках

2.1. Энергоёмкость нарезания чаш на брёвнах сруба дома ⁵ (Power capacity of shaping log ends while house construction)

Срубы деревянных домов изготавливают из оцилиндрованных бревен диаметром 18...32 см зимней заготовки. Для сборки сруба в бревнах выполняют цилиндрические чашки. Идеальная чашка вырезается в половину диаметра укладываемого бревна. Чашки формируются на чашкорезных станках. Для определения мощности механизма главного движения чашкорезного станка необходимо знать объём древесины удаляемой при формировании чашки. Эту задачу можно решить двумя способами.

Способ 1 – графический. При помощи системы автоматического проектирования AutoCAD, построим геометрическое тело, которое представляет собой вырезанную часть бревна (рис. 1). Используя функцию «геометрия и масса», построим соединение брёвен и найдем объём вырезанной части бревна при нарезании чашки.

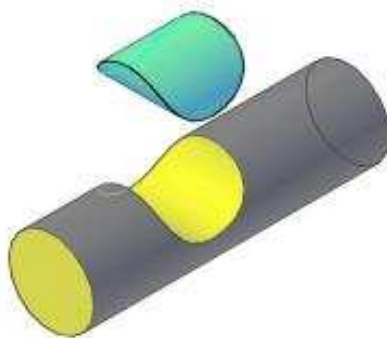


Рис. 1 – Объём древесины, удаляемый из бревна

⁵ Глебов, И. Т. Энергоёмкость нарезания чаш на брёвнах сруба дома = Power capacity of shaping log ends while house construction / И. Т. Глебов, Е. А. Смирнов // Международный евразийский симпозиум «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». Уральский государственный лесотехнический университет. – Екатеринбург, 2010. – С. 205–207.

Результаты полученных объемов для бревен различного диаметра сведены в табл. 1.

Таблица 1 – Объемы вырезанной части бревна при формировании чаш, см³

d, см	16	18	20	22	24	26	28	30	32
v, см ³	1189	1693	2323	3092	4014	5104	6374	7840	9515

Способ 2 – расчетный. Выведем формулу объёма вырезанной древесины при формировании чашки (рис. 2).

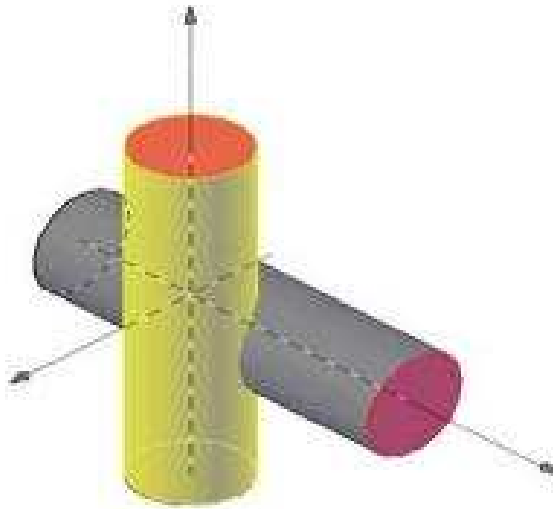


Рис. 2 – Расчетная схема к определению объема вырезанной части бревна при формировании чашки

Объём сложного геометрического тела есть двойной интеграл

$$v = 2 \int_{-R}^R \int_0^{\sqrt{R^2 - x^2}} \sqrt{R^2 - (y - R)^2} dy dx = 2,323R^3 = 0,290375d^3, \quad (1)$$

где v – объём чашки, см³;

R, d – радиус и диаметр бревна, см.

Произведём вычисления для нескольких диаметров брёвен и занесём данные в табл. 2. Полученные данные совпадают в обоих способах, что доказывает правильность решения.

Таблица 2 – Объем чаш, полученный расчетным способом

d, см	16	18	20	22	24	26	28	30	32
v, см ³	1189	1693	2323	3092	4014	5104	6374	7840	9515

Представим формулу объема чаши в виде

$$v = \xi d^3, \quad (2)$$

где v – объем чашки, см³;

d - диаметр бревна, см;

ξ – коэффициент, $\xi = 0,290375$.

Мощность фрезерования можно найти по удельной работе резания по формуле, кВт:

$$P = \frac{Kv'}{1000}, \quad (3)$$

где K – удельная работа резания, Дж/см³;

v' – секундный объем срезаемого слоя, см³/с.

Удельную работу находим по следующей формуле:

$$K = a_n a_w \left(k + \frac{\alpha_p p}{a} \right), \quad (4)$$

где a_n , a_w , α_p – поправочные коэффициенты соответственно на породу,

влажность древесины, затупление лезвия;

p – фиктивная сила резания, Н/мм;

k - касательное давление на переднюю грань лезвия, МПа.

Найдём секундный объем v' срезаемой древесины. Это есть отношение полного объема чашки к времени, за которое фреза удаляет этот объем, см³/с:

$$v' = v / t, \quad (5)$$

где v – объем древесины удаляемой при формировании чашки, см³;

t - время фрезерования, с.

Время t , за которое фреза удаляет древесину, есть отношение расстояния, пройденного фрезой (в нашем случае расстояние будет равно диаметру бревна), к скорости подачи.

$$t = \frac{0,6d}{V_s}, \quad (6)$$

где V_s – скорость подачи, м/мин.

Тогда секундный объем измельчаемой древесины равен

$$v' = \frac{v}{t} = \frac{vV_s}{0,6d}. \quad (7)$$

Используя формулу (3), получим мощность главного движения, кВт:

$$P = \frac{Kv'}{1000} = \frac{KvV_s}{600d}.$$

2.2. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от некоторых факторов цилиндрического фрезерования⁶

(Dependencies of Micro-roughness Height of Processed Surface on Some Factors of Cylinder Milling)

Основным видом неровностей на обработанной поверхности методом цилиндрического фрезерования является кинематическая волнистость.

Координаты гребней кинематических волн можно определить по следующим уравнениям:⁷

⁶ Глебов И.Т. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от некоторых факторов цилиндрического фрезерования = Dependencies of Micro-roughness Height of Processed Surface on Some Factors of Cylinder Milling /И.Т. Глебов// Лесной журнал. – 2010. –№ 1. – С.153-157.

⁷ Глебов, И.Т. Исследование шероховатости фрезерованной поверхности древесины / И.Т. Глебов // Деревообраб. пром-сть. – 2006. – № 3. – С. 11–12.

$$y_i = R - \sqrt{R_{1i}^2 - \left[\frac{S_z}{2} + \frac{\Delta(2R_{1i} - \Delta)}{2S_z} \right]^2}, \quad (1)$$

$$x_i = S_z(i-1) + \frac{\Delta(2R_{1i} - \Delta)}{2S_z} + \frac{S_z}{2}, \quad (2)$$

где y – высота гребня, мм;

x – абсцисса гребня, мм;

S_z – подача на зуб, мм;

i – номер пары зубьев;

Δ – неточность размеров радиусов, мм; $\Delta = \Delta_{1i-2i} = R_{1i} - R_{2i}$.

Пример 1. Пусть для фрезы диаметром 140 мм радиусы лезвий равны $R = R_1 = 70,06$ мм, $R_2 = 70,00$ мм, $R_3 = 69,96$ мм, $R_4 = 70,02$ мм.

Требуется определить координаты гребней волн и шероховатость фрезерованной поверхности.

Исходные данные и расчеты рекомендуется представить в виде табл.1.

Таблица 1 – Форма расчета координат гребней волн

Радиусы пар зубьев	$R_1 \dots R_2$	$R_2 \dots R_3$	$R_3 \dots R_4$	$R_4 \dots R_1$
Подача на зуб, мм	2	2	2	2
Максимальный радиус фрезы, мм	70,06	70,06	70,06	70,06
Радиусы лезвий в паре:				
R_{1i} , мм	70,06	70,0	69,96	70,02
R_{2i} , мм	70,0	69,96	70,02	70,06
Погрешность в паре лезвий, $\Delta i = R_{1i} - R_{2i}$, мм	0,06	0,04	-0,06	-0,04
Порядковый номер пары, i	1	2	3	4
Высота гребней по (1), y_i , мм	0,069	0,101	0,109	0,041
Абсцисса гребней по (2), x_i , мм	3,1	4,4	2,9	5,6

Шероховатость поверхности $R_{m \max} = 101$ мкм.

При решении обратных задач необходимо найти значение подачи на зуб по заданной шероховатости поверхности, а также диаметр фрезы и допустимую погрешность радиусов лезвий.

Если радиусы всех лезвий фрезы одинаковы, неточность их $\Delta=0$, то из формулы (1) следует, что при $R=R_1$ подача на зуб, мм

$$S_z = 2\sqrt{y(2R - y)}. \quad (3)$$

Кроме того, из (1) следует

$$S_z = \sqrt{y(2R - y)} + \sqrt{y(2R - y) - \Delta(2R - \Delta)}. \quad (4)$$

Отсюда можно сделать два вывода. **Во-первых**, неточность радиусов Δ фрезы не должна превышать высоту гребней кинематических волн y . **Во-вторых**, значение подачи на зуб складывается из двух слагаемых. Первое из них равно половине максимального значения S_z при $\Delta = 0$, а второе меньше первого с поправкой на погрешность длин радиусов Δ .

Исследованиями Ф.М. Манжоса установлено, что при установке ножей в ножевые валы или ножевые головки радиусы резания отдельных режущих кромок отличаются друг от друга на величину 0,07...0,15 мм. Прифуговка лезвий уменьшает неточность расположения режущих кромок, после чего $\Delta=0,04...0,06$ мм.

В табл. 2 приведены значения подачи на зуб, полученные по формуле (4). Максимальное значение S_z получено при $\Delta=0$, минимальное – при $\Delta=y$.

Пример 2. На фуговальном станке с диаметром окружности резания ножевого вала $D = 128$ мм требуется обработать заготовки с шероховатостью по кинематической волнистости $R_{m \max} = 25$ мкм.

Определить значение подачи на зуб.

Решение. Приняв погрешность радиусов лезвий $\Delta = 0,025$ мм

$$\begin{aligned} S_z &= \sqrt{y(2R - y)} + \sqrt{y(2R - y) - \Delta(2R - \Delta)} = \\ &= \sqrt{0,025(2 \cdot 64 - 0,025)} + \sqrt{0,025(2 \cdot 64 - 0,025) - 0,025(2 \cdot 64 - 0,025)} = 1,8 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Таблица 2 – Предельные значения подачи на зуб
при цилиндрическом фрезеровании древесины

Высота неровно- стей $R_{m \max}$, мкм	Значения подачи на зуб S_z , мм, при диаметре окружности резания D , мм							
	60	80	100	120	140	160	180	200
6,3	0,6/1,2	0,7/1,4	0,8/1,6	0,9/1,7	0,9/1,9	1,0/2,0	1,1/2,1	1,1/2,2
12,5	0,9/1,7	1,1/2,0	1,2/2,2	1,3/2,4	1,4/2,6	1,5/2,8	1,6/3,0	1,7/3,2
25	1,3/2,4	1,5/2,8	1,7/3,2	1,8/3,5	2,0/3,7	2,1/4,0	2,3/4,2	2,4/4,5
50	1,7/3,5	2,1/4,0	2,3/4,5	2,6/4,9	2,8/5,3	3,0/5,7	3,1/6,0	3,3/6,3
100	2,4/4,9	2,8/5,7	3,2/6,3	3,5/6,9	3,9/7,5	4,1/8,0	4,4/8,5	4,6/8,9
200	3,7/6,9	4,3/8,0	4,8/8,9	5,2/9,8	5,7/10,6	6,1/11,3	6,4/12,0	6,8/12,6
400	5,1/9,8	5,9/11,3	6,6/12,6	7,3/13,8	7,8/14,9	7,4/16,0	8,9/17,0	9,4/17,9
800	6,9/13,8	8,2/15,9	9,2/17,8	10,1/19,5	10,9/21,1	11,7/22,6	12,4/23,9	13,1/25,2

Пример 3. Заготовки обрабатываются на станке фрезой диаметром $D = 140$ мм с подачей на зуб $S_z = 4$ мм.

Определить шероховатость поверхности по высоте волн.

Решение. Из табл. 2 следует, что при заданном режиме работы станка шероховатость может быть в диапазоне 50...100 мкм. Приняв $\Delta = 0,05$ мм, $R = R_1$, по формуле (1) уточним значение высоты гребней волн

$$y_i = 70 - \sqrt{70 - \left[\frac{4}{2} + \frac{0,05(2 \cdot 70 - 0,05)}{2 \cdot 4} \right]^2} = 0,059 \text{ мм.}$$

Влияние на шероховатость поверхности радиального биения шпинделя станка. Шпиндели станков монтируются на шариковых подшипниках, которые имеют радиальные зазоры между кольцами и телами качения. При посадке подшипников на вал и в корпус зазоры могут быть сведены до минимума и даже до натяга. При вращении шпинделя тела качения под действием

центробежных сил прижимаются к наружному кольцу, между ними и дорожкой внутреннего кольца образуются зазоры. Величина зазоров и погрешностей формы тел качения и внутреннего кольца обуславливают величину радиального биения в месте посадки фрезы. Величина радиального биения фрезы фрезерных и продольно-фрезерных станков регламентирована и равна $\delta_r = 0,03$ мм.

Радиальное биение шпинделя в месте посадки фрезы измеряют индикатором (рис. 1). Если торцовую поверхность шпинделя поделить на 12 равных частей и от цилиндрической поверхности вала по радиусу в указанных точках отложить показания индикатора, то получим эпюру радиального отклонения вала за один его оборот. Форма эпюры – окружность радиуса r_δ , смещенная относительно центра вала на величину $\delta_r/2$. Эпюра жестко связана с валом и поворачивается вместе с ним.

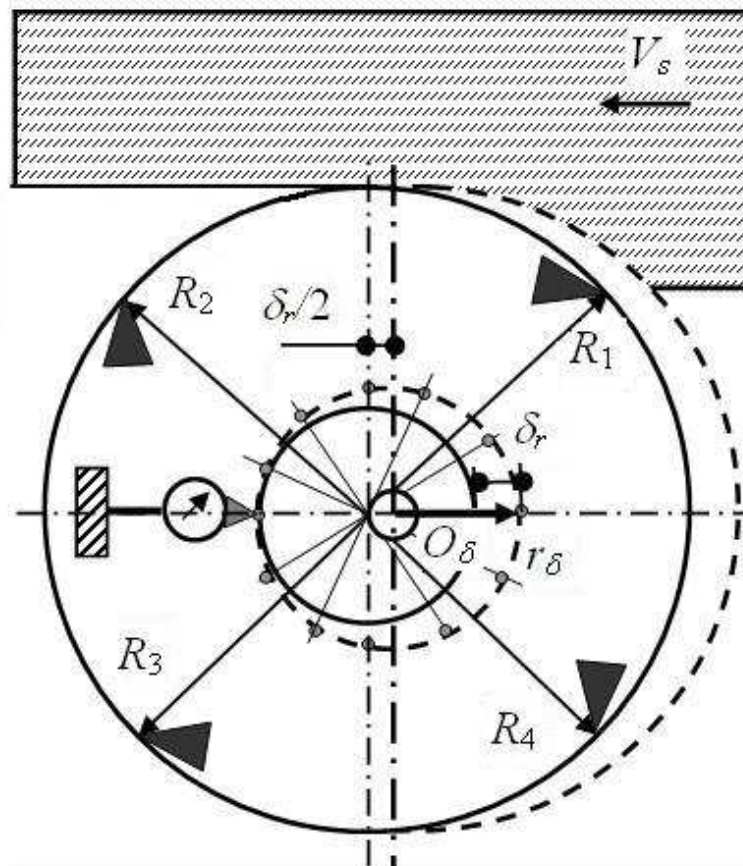


Рис. 1. Радиальное биение фрезы

Режущие кромки фрезы при вращении шпинделя двигаются по окружностям радиусов R_1, R_2, R_3, R_4 , и при этом центр вращения вала перемещается с той же частотой по окружности радиуса $\delta_r/2$ относительно центра O_δ .

Если направление r_δ максимального радиального биения параллельно вектору скорости подачи V_s и совпадает с направлением R_1 , то в момент врезания в древесину при продольном фрезеровании радиусы лезвий могут быть найдены по формуле

$$R_\delta = R + \delta_r \sin\varphi/2,$$

где R_δ – величина радиуса режущей кромки лезвия с учетом радиального биения; φ – угол поворота вала от горизонтальной оси.

Значения радиусов лезвий в точке врезания в древесину будут следующие:

$$\begin{aligned} R_{1\delta} &= R_1 + \delta_r \sin 270^\circ/2 = R_1 - \delta_r/2; \\ R_{2\delta} &= R_2; \quad R_{3\delta} = R_3 + \delta_r/2; \quad R_{4\delta} = R_4. \end{aligned} \quad (5)$$

Если фрезу насадить на вал под углом 45° по отношению к направлению r_δ (см. рис. 1), то значения радиусов лезвий можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} R_{1\delta} &= R_1 + \delta_r \sin(270^\circ + 45^\circ)/2 = R_1 - 0,35\delta_r; \\ R_{2\delta} &= R_2 + 0,35\delta_r; \quad R_{3\delta} = R_3 + 0,35\delta_r; \quad R_{4\delta} = R_4 - 0,35\delta_r. \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, можно считать, что радиальное биение шпинделя приводит к изменению радиусов режущих кромок фрезы в зоне резания (смещением центра вращения шпинделя пренебрегаем).

Пример 4. По условию примера 1 определить шероховатость фрезерованной поверхности с учетом радиального биения фрезы $\delta_r = 0,03$ мм. Фреза

насажена на вал так, что направление максимального биения фрезы совпадает с направлением скорости подачи и радиусом режущей кромки R_1 .

Решение. Определим значения радиусов режущих кромок:

$$R_{1\delta} = R_1 - \delta_r/2 = 70,06 - 0,03/2 = 70,585 \text{ мм}; \quad R_{2\delta} = R_2 = 70,0 \text{ мм};$$

$$R_{3\delta} = R_3 + \delta_r/2 = 69,96 + 0,015 = 69,976 \text{ мм}; \quad R_{4\delta} = R_4 = 70,02 \text{ мм}.$$

Исходные данные и расчеты приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Форма расчета координат гребней волн

Радиусы пар зубьев	$R_1...R_2$	$R_2...R_3$	$R_3...R_4$	$R_4...R_1$
Подача на зуб, мм	2	2	2	2
Максимальный радиус фрезы, мм	70,045	70,045	70,045	70,045
Радиусы лезвий в паре:				
R_{1i} , мм	70,045	70	69,976	70,02
R_{2i} , мм	70	69,976	70,02	70,045
Погрешность в паре				
лезвий, $\Delta i = R_{1i} - R_{2i}$, мм	0,045	0,024	-0,044	-0,025
Порядковый номер пары, i	1	2	3	4
Высота гребней по (1), y_i , мм	0,047	0,069	0,071	0,025
Абсцисса гребней по (2), x_i , мм	2,5	3,8	3,4	6,1

Шероховатость поверхности $R_{m \max} = 71$ мкм. Эпюра радиального биения наложилась так, что максимальный радиус фрезы уменьшился. Это привело к улучшению шероховатости поверхности.

Зависимость радиусов лезвий от точности посадки фрезы. При механическом креплении фрезы максимальный зазор вала диаметром 30...50 мм в посадочном отверстии (при посадке H7/h6) равен 41 мкм. Радиусы лезвий могут изменяться в пределах этого зазора.

2.3. Толщина срезаемого слоя при фрезеровании и пилении древесных материалов⁸

(Thickness of the cut-off layer during the milling and division by a saw wood materials)

При выборе режимов пиления и фрезерования кромок плитных материалов (фанеры, древесностружечных плит) и древесины основным расчетным параметром является толщина срезаемого слоя, от величины которой зависят производительность и точность процесса, шероховатость и силы резания.

Поскольку толщина срезаемого слоя при цилиндрическом фрезеровании и пилении круглыми пилами переменна, то в расчетах используют значение средней толщины срезаемого слоя, точность определения которой неудовлетворительна.

При цилиндрическом фрезеровании различают такие параметры как глубина фрезерования t (рис. 1), угол контакта φ_k , толщина срезаемого слоя мгновенная a (в любой точке дуги контакта l_k), средняя a_c , конечная a_{\max} (в конце дуги контакта при выходе лезвия из заготовки). В настоящее время мгновенное значение толщины срезаемого слоя на дуге контакта находят по формуле Фишера, мм:

$$a = S_z \sin \varphi, \quad (1)$$

где S_z – величина подачи на зуб фрезы, мм;

φ – мгновенный центральный угол контакта.

Поскольку мгновенная толщина срезаемого слоя на дуге контакта непрерывно изменяется по величине (от нуля в момент влезания зуба фрезы в обрабатываемый материал до максимального значения в момент выхода зуба из материала), то в расчетах пользуются средним значением толщины срезаемого слоя на дуге контакта.

⁸ Глебов В.В. Толщина срезаемого слоя при фрезеровании и пилении древесных материалов/ В.В. Глебов, И.Т. Глебов. – Труды БГТУ. – 2014. – № 2 (166). – С. 190–195.

Считается, что значение средней толщины срезаемого слоя расположено на середине дуги контакта.

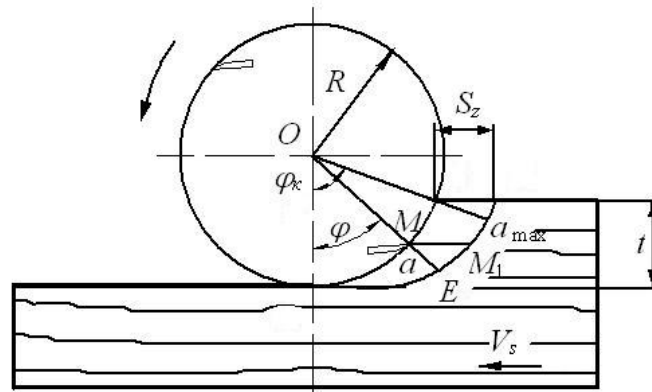


Рис. 1. Схема цилиндрического фрезерования

Его величина находится при небольших значениях глубины фрезерования [2, с. 162] так:

$$a_c = S_z \sqrt{\frac{t}{D}}, \quad (2)$$

где t – глубина фрезерования, мм;

D – диаметр окружности резания фрезы, мм;

При глубине фрезерования $t = D$ средняя толщина возникает при угле поворота 40° на дуге контакта [3, с. 225]

$$a_c = 0,64 S_z. \quad (3)$$

При этом остается неизвестным, как изменяется толщина срезаемого слоя при углах контакта в диапазоне $45^\circ \dots 180^\circ$.

Излагаемое ниже исследование выполнено с целью получения более точных данных для определения средней толщины срезаемого слоя при цилиндрическом фрезеровании.

Для исследования возьмем цилиндрическую фрезу диаметром $D = 60$ мм, работающую с подачей на зуб $S_z = 5$ мм. Максимально возможный

при фрезеровании угол контакта $\varphi_k = \pi = 180^\circ$ поделим на равные участки с шагом 15° . Длина дуги контакта, мм

$$l_k = R\varphi_k, \quad (4)$$

где R – радиус фрезы, мм.

Мгновенное значение толщины срезаемого слоя для каждого участка угла контакта (дуги контакта) найдем по формуле (1).

В осях координат: толщина срезаемого слоя и длина дуги контакта построим график изменения толщины срезаемого слоя (рис. 2).

Кривая зависимости – синусоида. Максимальное значение $a = 5$ мм имеет при угле контакта $90^\circ = \pi/2$ радиан.

Для определения среднего значения толщины срезаемого слоя a_c , например, на участке дуги контакта OB , поступаем так. Находим площадь OAB под синусоидой на участке OB и приравниваем ее к площади прямоугольника $OCEB$, высота которого равна a_c .

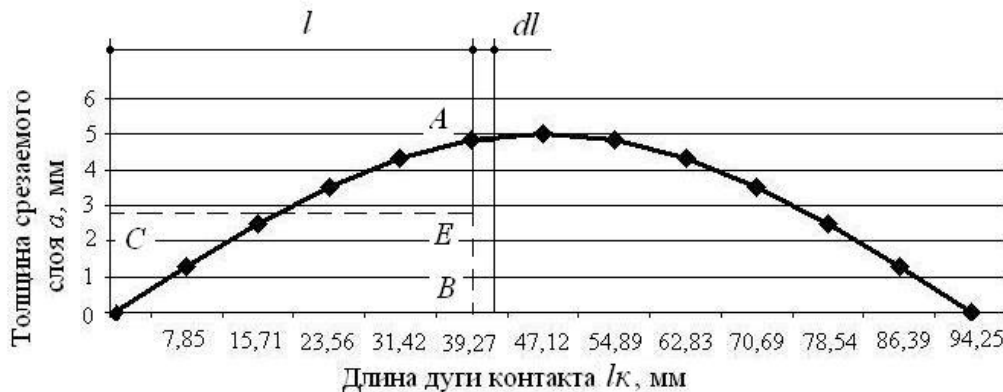


Рис. 2. Изменение мгновенного значения толщины срезаемого слоя на дуге контакта

Найдем площадь под всей синусоидой [4, с. 129]. Для этого на расстоянии l от начала координат выделим элементарную площадку dl высотой $AB = S_z \sin \varphi$. Площадь выделенного участка равна

$$dS = S_z \sin \frac{l}{R} dl.$$

Площадь под синусоидой равна

$$S = S_z \int_{l_k}^0 \sin \frac{l}{R} dl = S_z \int_{l_k}^0 \sin \frac{l}{R} dl \frac{R}{R} = S_z R \int_{l_k}^0 \sin \frac{l}{R} d \frac{l}{R}.$$

$$S = S_z R (1 - \cos \frac{l_k}{R}). \quad (5)$$

Тогда среднее значение толщины срезаемого слоя на участке длиной l_k будет равно

$$a_c = \frac{S_z R}{l_k} (1 - \cos \frac{l_k}{R}) = \frac{S_z}{(\varphi_{\text{вх}} - \varphi_{\text{вых}})} (\cos \varphi_{\text{вх}} - \cos \varphi_{\text{вых}}), \quad (6)$$

где $\varphi_{\text{вх}}$ и $\varphi_{\text{вых}}$ – центральные углы входа и выхода лезвия из заготовки, рад.

Изменение толщины срезаемого слоя (мгновенной a и средней a_c) показано в прилагаемой таблице и на рис. 3.

В таблице 1 приведен алгоритм решения задачи по определению средней толщины срезаемого слоя и результаты расчетов с использованием формулы (6). В расчетах принято $S_z = 5$ мм; радиус фрезы $R = 30$ мм.

Параметры таблицы получены так:

t – глубина фрезерования, мм; задана произвольно;

φ_k – угол контакта, рад.:

$$\varphi_k = \arccos(\frac{R-t}{R}); \quad (7)$$

l_k – длина дуги контакта, мм:

$$l_k = R \varphi_k;$$

a – мгновенное значение толщины срезаемого слоя на дуге контакта, мм:

$$a = S_z \sin \varphi_k;$$

a_c – среднее значение толщины срезаемого слоя на дуге контакта, мм, найдено по формуле (6).

φ_{ac} – центральный угол контакта, при котором толщина срезаемого слоя достигает среднего значения на дуге контакта, рад.:

$$\varphi_{ac} = \arcsin\left(\frac{\cos \varphi_{ex} - \cos \varphi_{blyx}}{\varphi_{blyx} - \varphi_{ex}}\right). \quad (8)$$

Анализируя таблицу 1, можно сделать следующие выводы.

1. Мгновенное значение толщины срезаемого слоя a на дуге контакта увеличивается и достигает максимума при угле поворота фрезы на угол 90° ($\pi/2$ рад.). При дальнейшем повороте фрезы значение толщины срезаемого слоя убывает до нуля (при угле поворота 180°).

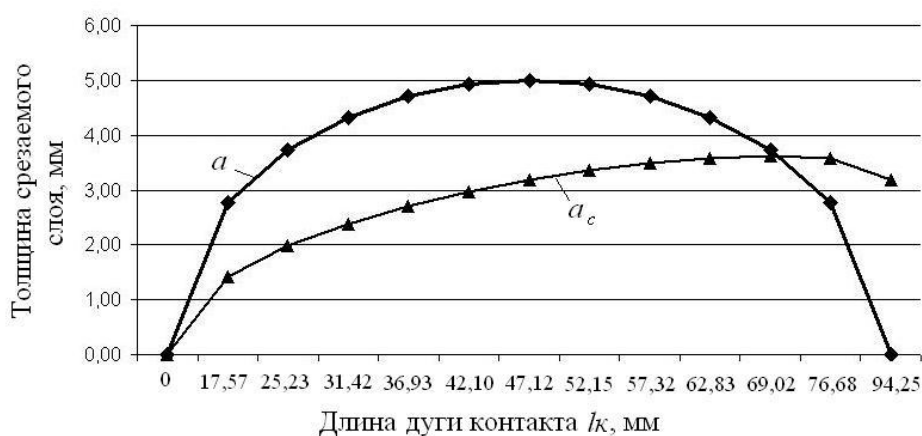


Рис. 3. Изменение толщины срезаемого слоя на дуге контакта

2. Среднее значение толщины срезаемого слоя на дуге контакта определяется по формуле (6). С увеличением дуги контакта до $146,7^\circ$ ($2,56$ рад.) значение a_c постоянно растет с замедленным темпом и, наконец, падает до $a_c = 3,18$ мм.

3. Если глубина фрезерования $t = 10$ мм, то мгновенная толщина срезаемого слоя достигает максимума на выходе и равна $a = 3,73$ мм, $a_c = 1,98$ мм. Отношение $a_c/a = 0,53$. Можно принять, что средняя толщина срезаемого слоя примерно равна половине максимальной. Так принято в современной теории фрезерования. Но такое положение справедливо только для тонких глубин фрезерования. В остальных случаях отношение $a_c/a > 0,6$ и поэтому недопустимо принимать $a_c = 0,5a$.

Таблица 1

Результаты расчетов значений a_c

t, мм	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
φ_k , рад	0,84	1,05	1,23	1,40	1,57	1,74	1,91	2,09	2,30	2,56	3,14
l_k , мм	25,23	31,42	36,93	42,10	47,12	52,15	57,32	62,83	69,02	76,68	94,25
a , мм	3,73	4,33	4,71	4,93	5,00	4,93	4,71	4,33	3,73	2,76	0,00
a_c , мм	1,98	2,39	2,71	2,97	3,18	3,36	3,49	3,58	3,62	3,59	3,18
a_c/a	0,53	0,55	0,57	0,60	0,64	0,68	0,74	0,83	0,97	1,30	-
φ_{ac} , рад.	0,41	0,50	0,57	0,64	0,69	0,74	0,77	0,80	0,81	0,80	0,69
φ_{ac} , град.	23,3	28,5	32,8	36,4	39,5	42,2	44,3	45,7	46,4	45,8	39,5
Φ_{ac} / φ_k	0,48	0,48	0,46	0,45	0,44	0,42	0,40	0,38	0,35	0,31	0,22

4. Точку расположения средней толщины срезаемого слоя a_c на дуге контакта можно установить по отношению φ_{ac} / φ_k , которое непрерывно убывает от 0,48 до 0,22. Это означает, что a_c достигает своего значения на первой половине дуги контакта. В этой точке дуги контакта следует прикладывать расчетные силы резания, скорость главного движения. Угол контакта средней толщины срезаемого слоя непрерывно растет от $23,3^\circ$ до $45,8^\circ$ и, наконец, падает до $39,5^\circ$. При продольном фрезеровании древесины указанные углы будут углами перерезания волокон древесины. Их значения находятся по формуле (8).

5. С изменением радиуса фрезы или подачи на зуб характер зависимостей остается прежним.

Средняя толщина срезаемого слоя при пилении. Изложенный метод определения средней толщины срезаемого слоя можно применить к процессу пиления древесины и древесных материалов круглыми пилами (рис. 4).

Каждый зуб пилы срезает слой древесины $ABCD$. Толщина этого слоя в любой точке траектории измеряется по направлению радиуса в этой точке и определяется по формуле

$$a = S_z \sin \varphi,$$

где S_z – подача на один зуб, мм;

φ – угол поворота пилы в выбранной точке траектории.

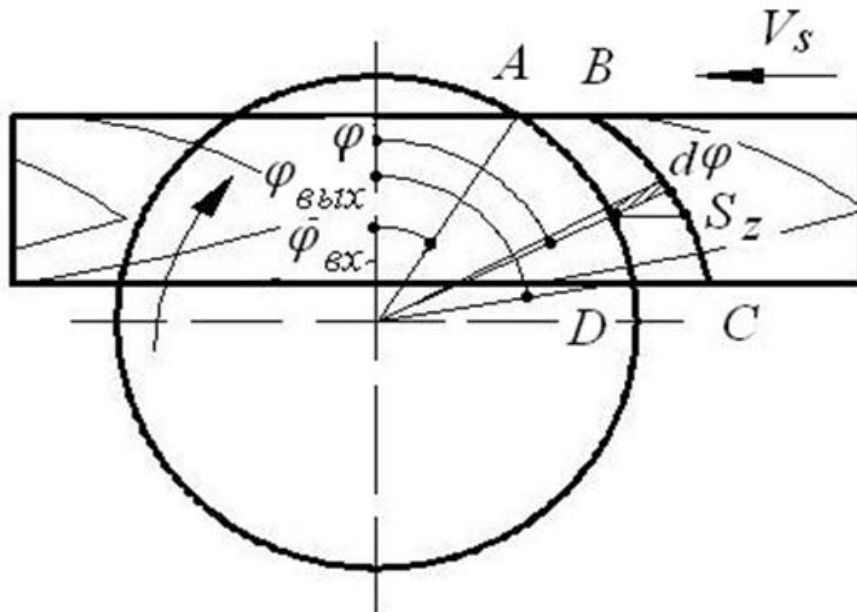


Рис. 4. Схема изменения толщины срезаемого слоя при пилении круглой пилой

В срезаемом слое выделим элементарную площадку шириной $d\varphi$ и высотой a . Элементарная площадь

$$dS = S_z \sin \varphi \cdot d\varphi.$$

Площадь срезаемого слоя

$$S = S_z \int_{\varphi_{\text{вх}}}^{\varphi_{\text{вых}}} \sin \varphi \cdot d\varphi = S_z (\cos \varphi_{\text{вх}} - \cos \varphi_{\text{вых}}).$$

Средняя толщина срезаемого слоя, мм

$$a_c = \frac{S_z}{(\varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}})} (\cos \varphi_{\text{вх}} - \cos \varphi_{\text{вых}}). \quad (9)$$

Формула (9) является общей как для пиления, так и фрезерования.

Пример. Дано: на фрезерном станке с ЧПУ обрабатывается кромка фанеры концевой фрезой диаметром $D = 6$ мм, с подачей на зуб $S_z = 0,5$ мм при глубине фрезерования $t = 2 \dots 6$ мм.

Определить среднюю толщину срезаемого слоя и угол контакта, при котором эта толщина будет иметь значение. Порядок расчета сведен в таблицу 2. Углы входа лезвия фрезы в заготовку и выхода определены по формуле (7), средняя толщина срезаемого слоя a_c – по формуле (9), центральный угол контакта φ_{ac} , при котором толщина срезаемого слоя достигает среднего значения на дуге контакта – (8).

Таблица 2 – Результаты расчета примера

S_z	мм	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
t	мм	2	3	4	5	6
D	мм	6	6	6	6	6
$\varphi_{\text{вход}}$	рад	0	0	0	0	0
$\varphi_{\text{выход}}$	рад	1,49	1,57	1,65	1,74	1,82
a_c		0,44	0,50	0,55	0,60	0,64
φ_{ac}	рад	0,664038	0,690107	0,714035	0,735793	0,755295
φ_{ac}	град	38,0	39,5	40,9	42,2	43,3

В точке дуги контакта с центральным углом φ_{ac} должны прикладываться средние силы резания.

2.4. Расчет режимов фрезерования торцевой фрезой⁹

(Calculation of the modes of milling by a face mill)

Методом фрезерования торцевой фрезой обрабатывается большое количество профилей деталей дверей, дверных коробок, филенок, мебельных рамок, деталей окон, раскладок, штапиков, наличников, плинтусов и др. На рис. 1 приведены примеры профилей некоторых деталей.

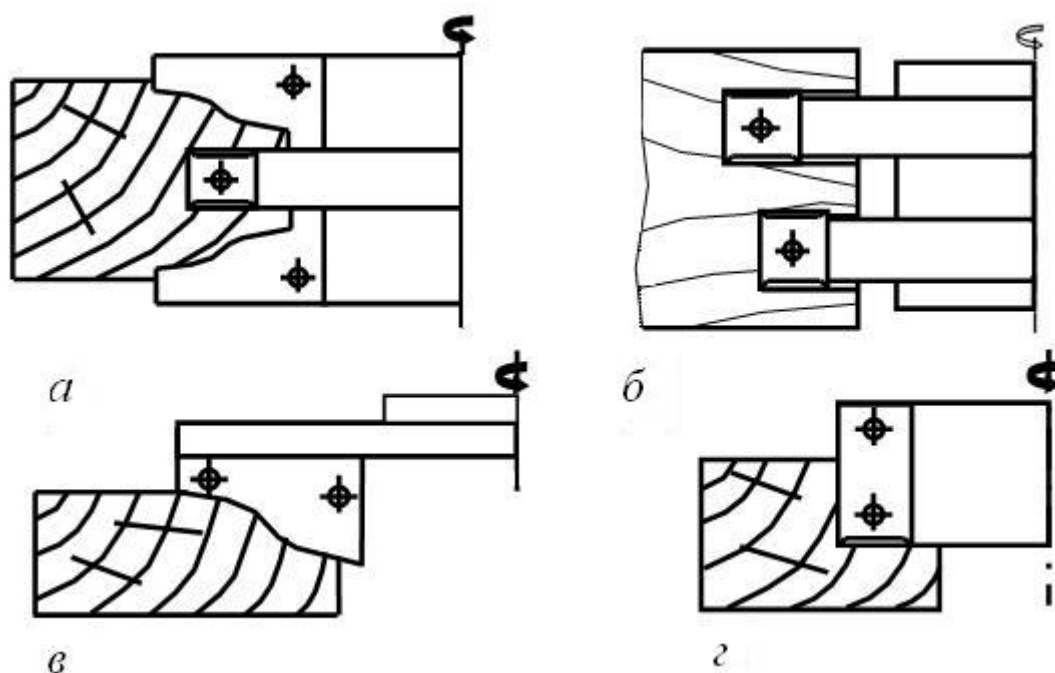


Рис. 1. Обработка профилей деталей:
а – бруска двери; *б* – бруска дверной коробки;
в – мебельной филенки; *г* – выборка четверти

Боковая режущая кромка лезвия торцевой фрезы может быть прямой или криволинейной, наклонной или вертикальной. Торцовая кромка прямая. В современных торцевых фрезах используются неперетачиваемые твердосплавные ножи одноразового использования.

⁹ Глебов И.Т. Расчет режимов фрезерования торцевой фрезой = Calculation of the modes of milling by a face mill/ И.Т. Глебов//Вестник Московского государственного университета – Лесной вестник. – 2007. – №1. – С. 71-73.

Фиктивная сила и касательное давление срезаемого слоя

При продольном фрезеровании древесины торцевой фрезой боковая наклонная режущая кромка выполняет резание продольно-поперечно-торцовое (рис. 2).

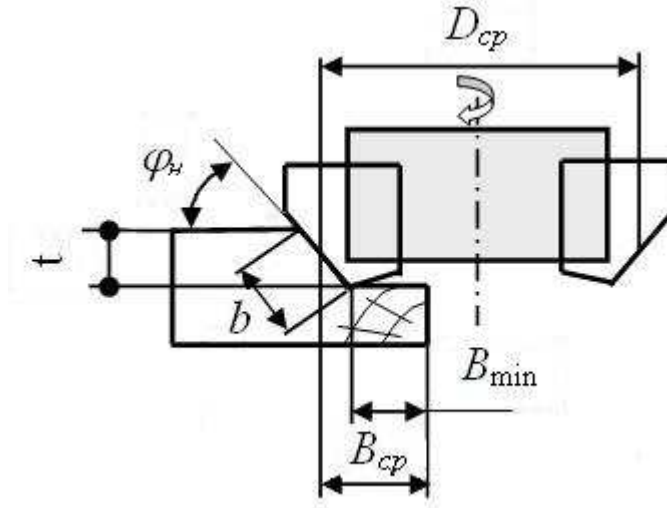


Рис. 2. Параметры торцово-конического фрезерования

При угле наклона боковой режущей кромки $\varphi_n = 0$ резание на дуге контакта изменяется от продольного, когда происходит врезание лезвия в древесину, до поперечного в момент выхода зуба из заготовки. Если угол $\varphi_n = 90^\circ$, то резание изменяется от продольного в момент врезания до торцового в момент выхода зуба из древесины.

Для продольно-поперечного резания древесины сосны значение фиктивной силы резания p , Н/мм, найденное по методике А.Л. Бершадского, равно:

$$p_{//-\#} = 1,57 - 0,0065\varphi_c. \quad (1)$$

Касательное давление срезаемого слоя на переднюю поверхность лезвия k , МПа, равно

$$k_{//-\#} = (0,196 - 0,00184\varphi_c)\delta + [0,069 - 0,011(0,069 - B)\varphi_c] V' - (5,4 - 0,053\varphi_c), \quad (2)$$

где φ_c – угол скоса на середине дуги контакта, измеряемый между режущей кромкой и волокнами древесины при $\varphi_n = 0$ (значение φ_c подставляется в градусах);

V' – скорость резания, м/с; если скорость главного движения $V < 50$ м/с, то $V' = 90 - V$, иначе $V' = V$;

B – коэффициент, при угле резания $\delta \leq 55^\circ$ $B = 0,059$, при $\delta > 55^\circ$ $B = 0,069$.

При переходе резания от продольно-поперечного к продольно-поперечно-торцовому, когда $0 < \varphi_n < 90^\circ$, сопротивление резанию будет увеличиваться. Полагая, что увеличение значений p и k произойдет пропорционально углу наклона φ_n , получим

$$p_{//-\#-\perp} = p_{//-\#} + (p_{\perp} - p_{//-\#})\varphi_n / 90, \quad (3)$$

$$k_{//-\#-\perp} = k_{//-\#} + (k_{\perp} - k_{//-\#})\varphi_n / 90. \quad (4)$$

По данным А.Л. Бершадского для древесины сосны $p_{\perp} = 4,8$ Н/мм;

$$k_{\perp} = 0,55\delta + 0,196V' - 19,62. \quad (5)$$

При ширине фрезерования B_{cp} среднее значение угла скоса φ_c имеет место на середине дуги контакта и равно

$$\varphi_c = \frac{\varphi_k}{2} = \arcsin \sqrt{\frac{B_{cp}}{D_{cp}}}. \quad (6)$$

где D_{cp} – средний диаметр окружности резания фрезы, мм.

$$D_{cp} = D_{\min} + t / \operatorname{tg} \varphi_n, \quad (7)$$

где t – глубина фрезерования, мм.

Средняя скорость главного движения при фрезеровании, м/с

$$V = \frac{\pi D_{cp} n}{60000},$$

где n – частота вращения фрезы, мин^{-1} .

По формулам (3) и (4) получим

$$p_{//\# \perp} = 1,57 - 0,0065\varphi_c(1 - 0,0111\varphi_n) + 0,0359\varphi_n; \quad (8)$$

$$k_{//\# \perp} = \delta[0,196 + 0,0039\varphi_n - 0,00184\varphi_c(1 - 0,011\varphi_n)] + \\ + V'[0,069 - 0,011\varphi_c(0,069 - B)(1 - 0,011\varphi_n) + 0,00143\varphi_n] - \\ - 5,4 + 0,053\varphi_c(1 - 0,011\varphi_n) - 0,158\varphi_n. \quad (9)$$

Здесь φ_c , φ_n , δ подставляются в град. Кроме того, значение $B = 0,059$ при $\delta \leq 55^\circ$ и $B = 0,069$ при $\delta > 55^\circ$.

Геометрия срезаемого слоя

Глубина фрезерования (глубина резания при фрезеровании) t , мм – толщина слоя материала, снимаемого с поверхности заготовки фрезой за один проход. Она равна расстоянию между обрабатываемой и обработанной поверхностями (см. рис. 2).

Ширина фрезерования B , мм – ширина поверхности обрабатываемой фрезой за один проход (рис. 2).

Среднее значение ширины фрезерования B_{cp} , мм – расстояние от боковой кромки заготовки до точки, расположенной на середине ширины срезаемого слоя наклонного профиля:

$$B_{cp} = B + 0,5t / \operatorname{tg} \varphi_n.$$

Ширина срезаемого слоя b , мм – ширина сечения срезаемого слоя, удаляемого с заготовки за один проход

$$b = \frac{t}{\sin \varphi_n}, \quad (10)$$

где φ_n – угол наклона боковой режущей кромки к обработанной поверхности.

Средний угол контакта для среднего диаметра фрезы определяется на середине глубины фрезерования и равен из (6)

$$\varphi_k = 2\varphi_c.$$

Средняя длина дуги контакта

$$l_k = \frac{\pi D_{cp} \varphi_k}{360}, \quad (11)$$

где φ_k – средний угол контакта лезвия с заготовкой, рад.

Толщина срезаемого слоя a , мм, измеряется как наикратчайшее расстояние между предыдущей и последующей поверхностями резания на середине дуги контакта. При встречном фрезеровании толщина срезаемого слоя изменяется от нуля, когда режущая кромка врезается в древесину, до максимального значения в момент выхода лезвия из заготовки. Среднее значение толщины срезаемого слоя можно найти по следующей формуле:

$$a_{cp} = S_z \sin \varphi_n \sin \varphi_{cp}, \quad (12)$$

где S_z – подача на зуб, мм;

φ_{cp} – средний угол на дуге контакта, равный $\varphi_k/2$;

Для продольно-торцового резания можно принять угол перерезания волокон $\varphi_v = \varphi_{cp}$.

Силы резания при фрезеровании

Силы резания на зубе фрезы определяют для двух диапазонов толщины срезаемого слоя: $a \geq 0,1$ мм и $a \leq 0,1$ мм. Для диапазона $a \geq 0,1$ мм силу резания находят по формуле, Н

$$F_{x \text{ зуб}} = a_n a_w (\alpha_p p + ka) b. \quad (13)$$

Для диапазона $a \leq 0,1$ мм силу резания следует определять по формуле, Н [2]:

$$F_{x \text{ зуб}} = a_n a_w [(\alpha_p p + 0,1k) \left(-\frac{1}{\lambda} a^2 + \frac{0,2}{\lambda} a + 1 - \frac{0,01}{\lambda} \right)] b, \quad (14)$$

где p, k – фиктивная сила резания и касательное давление для древесины сосны с влажностью 12%;

a_n, a_w – поправочные коэффициенты на породу древесины и влажность;

λ – коэффициент; $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$, где ρ – радиус закругления режущей кромки зуба фрезы, мм.

Обозначим

$$F_{x \text{ 0,1}} = \alpha_p p + 0,1k,$$

$$m_1 = \frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w b F_{x 0.1}},$$

тогда при $a = 0,1$ мм $m_1 = 1$.

Запишем уравнение (14) в форме приведенного квадратного уравнения

$$a^2 - 0,2a - 1 + \lambda(m_1 - 1) = 0,$$

при решении которого получим

$$a = 0,1 - \sqrt{\lambda(1 - m_1)}. \quad (15)$$

При решении обратных задач, когда по силе резания на лезвии определяют толщину срезаемого слоя a , следует поступать так:

– если $m_1 \geq 1$, то надо пользоваться уравнением

$$a = \frac{\frac{F_{x \text{ зуб}}}{a_n a_w b} - \alpha_p P}{k};$$

– если $m_1 \leq 1$, то надо пользоваться уравнением (15).

Пример расчета

Дано. На фрезерном станке из древесины сосны с влажностью 12% обрабатывается деталь сложного профиля (см. рис. 2). Ширина фрезерования $B_{\min} = 22$ мм, глубина фрезерования $t = 8; 12; 15; 20$ мм, минимальный диаметр окружности резания наклонной режущей кромки $D_{\min} = 120$ мм, угол наклона боковой режущей кромки $\varphi_n = 45^\circ$, частота вращения вала $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$, число ножей $z = 4$, угол резания ножей $\delta = 70^\circ$. Ножи выполнены из твердого сплава марки ВК15. Период стойкости ножей $T = 1200$ мин

Мощность электродвигателя механизма главного движения станка $P = 3$ кВт, КПД передачи $\eta = 0,94$.

Определить скорости подач.

Решение. 1. Средний диаметр окружности резания фрезы (результаты расчета сведены в табл. 1)

$$D_{cp} = D_{min} + t / \operatorname{tg} \varphi_n = 120 + 8 / \operatorname{tg} 45 = 128 \text{ мм.}$$

2. Скорость главного движения

$$V = \pi D_{cp} n / 60000 = 3,14 \cdot 128 \cdot 5000 / 60000 = 33,51 \text{ м/с.}$$

3. Среднее значение ширины фрезерования

$$B_{cp} = B_{min} + 0,5t / \operatorname{tg} \varphi_n = 22 + 0,5 \cdot 8 / \operatorname{tg} 45 = 26 \text{ мм.}$$

4. Значение угла скоса

$$\varphi_c = \arcsin \sqrt{\frac{B_{cp}}{D_{cp}}} = \arcsin \sqrt{\frac{26}{128}} = 26,8^\circ.$$

5. Угол контакта боковой режущей кромки с заготовкой

$$\varphi_k = 2\varphi_c = 2 \cdot 26,8 = 53,6^\circ.$$

6. Длина дуги контакта

$$l_k = \frac{\pi D_{cp} \varphi_k}{360} = \frac{3,14 \cdot 128 \cdot 53,6}{360} = 59,8 \text{ мм.}$$

7. Прирост затупления лезвий за время работы при коэффициентах использования станка и производительности $K_u = 0,92$; $K_n = 0,94$

$$\Delta\rho = \gamma_{\Delta k} n T K_n K_u / 1000 = 0,00006 \cdot 69,3 \cdot 5000 \cdot 1200 \cdot 0,92 \cdot 0,94 / 1000 = 18,6 \text{ мкм.}$$

8. Фиктивная сила резания

$$\begin{aligned} p_{//-\#-\perp} &= 1,57 - 0,0065\varphi_c(1 - 0,0111\varphi_n) + 0,0359\varphi_n = \\ &= 1,57 - 0,0065 \cdot 26,8(1 - 0,0111 \cdot 45) + 0,0359 \cdot 45 = 3,1 \text{ Н/мм.} \end{aligned}$$

9. Касательное давление стружки на переднюю грань

$$\begin{aligned} k &= \delta[0,196 + 0,0039\varphi_n - 0,00184\varphi_c(1 - 0,011\varphi_n)] + \\ &+ V'[0,069 - 0,011\varphi_c(0,069 - B)(1 - 0,011\varphi_n) + 0,00143\varphi_n] - \\ &- 5,4 + 0,053\varphi_c(1 - 0,011\varphi_n) - 0,158\varphi_n = \\ &= 70[0,196 + 0,0039 \cdot 45 - 0,00184 \cdot 26,8(1 - 0,011 \cdot 45)] + \end{aligned}$$

$$+ (90 - 33,51)[0,069 - 0,011 \cdot 26,8(0,069 - 0,069)(1 - 0,011 \cdot 45) + 0,00143 \cdot 45] - \\ - 5,4 + 0,053 \cdot 26,8(1 - 0,011 \cdot 45) - 0,158 \cdot 45 = 20 \text{ МПа.}$$

Таблица 1 – Результаты расчетов

Параметры	Обозначение	Размерность	Глубина фрезерования t , мм			
			8	12	15	20
Средний диаметр фрезы	D_{cp}	мм	128	132	135	140
Скорость резания	V	м/с	33,51	34,56	35,34	36,65
Средняя ширина фрезерования	B_{cp}	мм	26	28	29,5	32
Угол скоса	φ_c	град	26,8	27,4	27,9	28,6
Угол контакта	φ_k	град	53,6	54,8	55,7	57,1
Длина дуги контакта	l_k	мм	59,8	63,2	65,7	69,8
Прирост затупления	Δ_p	мкм	18,6	19,7	20,4	21,7
Фиктивная сила резания	p	Н/мм	3,1	3,1	3,09	3,09
Касательное давление	k	МПа	20	19,84	19,72	19,52
Коэффициент затупления	α_p	–	1,56	1,59	1,61	1,64
Окружная сила резания	F_{xo}	Н	84,2	81,6	79,8	76,9
Средняя сила резания на дуге контакта	$F_{xзуб}$	Н	141,4	133,9	128,8	121,2
Средняя ширина среза	b	мм	9,4	14,1	17,6	23,5
Коэффициент m_1	m_1	-	2,2	1,38	1,05	0,73
Толщина срезаемого слоя	a	мм	0,51	0,23	0,12	-
	a	мм	-	-	-	0,035
Подача на зуб при	S_z	мм	1,6	0,71	0,36	-
Скорость подачи при	V_s	м/мин	32	14,2	7,2	0,102
						2,04

10 Коэффициент затупления

$$\alpha_p = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_p}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{20}{3,1}) \frac{18,6}{5 + 50} = 1,56.$$

11. Окружная касательная сила резания

$$F_{xo} = 1000P\eta/V = 1000 \cdot 3 \cdot 0,94 / 33,51 = 84,2 \text{ Н.}$$

12. Средняя сила резания на дуге контакта

$$F_{xзуб} = F_{xo} \pi D_{cp} / (l_k z) = 84,2 \cdot 3,14 \cdot 128 / (59,8 \cdot 4) = 141,4 \text{ Н.}$$

13. Ширина срезаемого слоя

$$b = \frac{t}{\sin \varphi_H} = \frac{8}{\sin 45} = 9,4 \text{ мм.}$$

14. Средняя толщина срезаемого слоя

Коэффициенты

$$\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01; \rho = \rho_o + \Delta_\rho; \rho - \text{в мм.}$$

$$\lambda = (0,005 + 0,0186)^2 + 0,2(0,005 + 0,0186) + 0,01 = 0,015285.$$

$$F_{x0,1} = \alpha_\rho p + 0,1k = 1,56 \cdot 3,1 + 0,1 \cdot 20 = 6,83 \text{ Н/мм.}$$

$$m_1 = \frac{F_{xзуб}}{a_n a_w b F_{x0,1}} = \frac{141,4}{1 \cdot 1 \cdot 9,4 \cdot 6,83} = 2,2.$$

Так как $m_1 > 1$, то толщина срезаемого слоя a_c определяется по формуле для макрослоев

$$a_c = \frac{\frac{F_{xзуб}}{a_n a_w b} - \alpha_\rho p}{k} = \frac{\frac{141,4}{1 \cdot 1 \cdot 9,4} - 1,56 \cdot 3,1}{20} = 0,51 \text{ мм.}$$

В случае, когда глубина фрезерования $t = 20$ мм, коэффициент $m_1 = 0,73 < 1$ и толщина срезаемого слоя находится по формуле

$$a_{cm} = 0,1 - \sqrt{\lambda(1 - m_1)} = 0,1 - \sqrt{0,015285(1 - 0,73)} = 0,035 \text{ мм.}$$

15. Максимально допустимая подача на зуб

$$S_z = \frac{a_c}{\sin \varphi_H \sin \varphi_c} S_z = \frac{0,51}{\sin 45 \sin 26,8} = 1,6 \text{ мм.}$$

16. Скорость подачи

$$V_s = S_z z n / 1000 = 1,6 \cdot 4 \cdot 5000 / 1000 = 32 \text{ м/мин.}$$

Вывод. С увеличением глубины фрезерования скорость подачи убывает.

2.5. Расчет мощности круглопильного раскряжевочного станка¹⁰ (Calculation of power of the round-saw log cutter)

Раскряжевочные станки предназначены для раскря, например, фанерных кряжей по длине на чураки. Кряжи диаметром 16...60 см распиливаются в поперечном направлении пилами диаметром до 1250; 1500 мм и толщиной 5,0...5,5 мм. Зубья пил разводят с уширением на сторону до 1,5...2,0 мм, так что ширина пропила достигает 8 мм, а иногда до 12 мм. Мощность электродвигателей механизмов главного движения современных раскряжевочных станков составляет 30...40 кВт. При этом в технической литературе нет четких рекомендаций по расчету мощности подобных станков.

Для поперечного раскря кряжей на чураки используют станки с механизмом надвигания маятникового типа, балансирные, суппортные.

На рис. 1, а приведена расчетная схема пути надвигания пилы в направлении подачи для раскряжевочного станка маятникового типа. На схеме показан роликовый конвейер 1, на котором перемещается и базируется при поперечной распиловке кряж 2. Маятник 4 с круглой пилой 5 шарнирно закреплен на верхней стойке 3 и может совершать от отдельного привода качательное движение относительно кряжа. Пила показана в положении врезания в древесину и выхода из кряжа.

Верхняя стойка расположена над роликовым конвейером на высоте H , мм:

$$H = L + 0,5D - 10, \quad (1)$$

где L – длина маятника OO_1 , мм;

D – диаметр пильного диска, мм.

¹⁰ Глебов И.Т. Расчет мощности круглопильного раскряжевочного станка = Calculation of power of the round-saw log cutter/ И.Т.Глебов, В.В. Глебов// Международный евразийский симпозиум «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». – Екатеринбург, 2012. – С. 149–158.

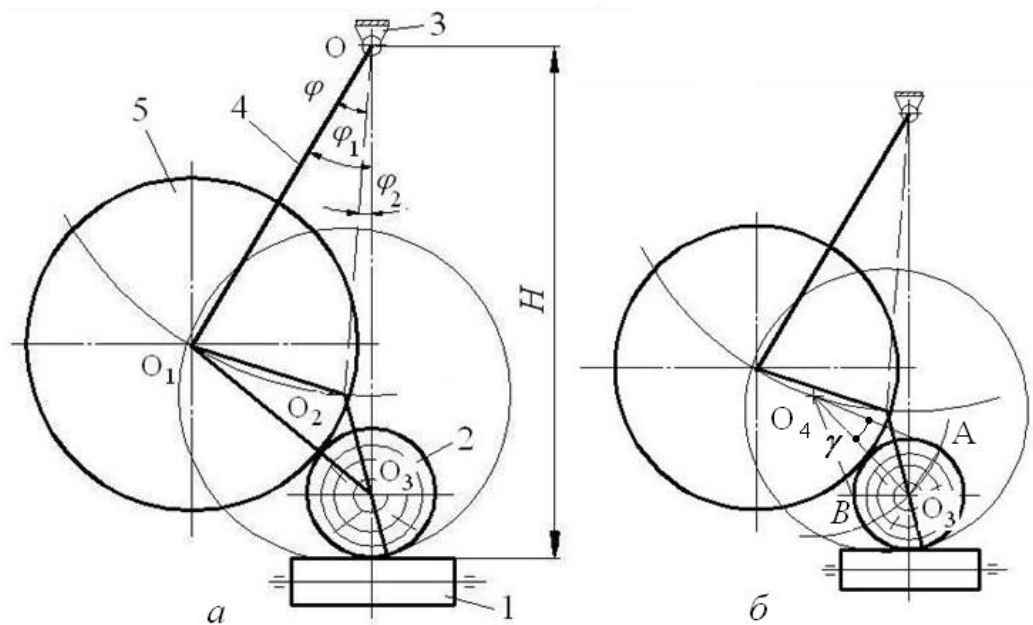


Рис. 1. Расчетная схема деления кряжа на чурaki:

a – к расчету пути надвигания пилы на кряж;

б – к расчету дуги контакта пилы с лревесиной;

1 – конвейер; 2– кряж; 3 – стойка маятника; 4 – маятник; 5 – пила

Путь надвигания пилы равен отрезку дуги $l = O_1O_2$ между центрами пилы в крайних положениях. Для ее нахождения отметим:

- расстояние $O_1O_3 = R + r$, где R – радиус пилы, мм; r – радиус кряжа, мм;
- расстояние $O_2O_3 = R - r$;
- расстояние $OO_3 = H - r$.

Угол

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (2)$$

Используя теорему косинусов [1], получим значение углов, рад.:

$$\varphi_1 = \arccos\left(\frac{L^2 + (H - r)^2 - (R + r)^2}{2L(H - r)}\right); \quad (3)$$

$$\varphi_2 = \arccos\left(\frac{L^2 + (H - r)^2 - (R - r)^2}{2L(H - r)}\right). \quad (4)$$

Тогда путь надвигания пилы равен, мм:

$$l = L\varphi. \quad (5)$$

Из полученных формул следует, что величина пути надвигания пилы зависит от нескольких факторов: длины маятника, высоты расположения стойки маятника, радиусов пилы и распиливаемого кряжа. Только при оптимальном выборе указанных параметров можно сократить путь надвигания и уменьшить мощность механизма главного движения станка.

Длина дуги контакта l_k зубьев пилы с древесиной кряжа изменяется от нуля в момент врезания пилы в кряж до максимального значения AB (рис. 1, б), когда дуга окружности пилы проходит через центр O_3 поперечного сечения кряжа. В расчетах удобно пользоваться средним значением дуги контакта, которое равно половине дуги AB и равно длине дуги O_3A .

Из треугольника O_3O_4A получим

$$r^2 = R^2 + R^2 - 2R^2 \cos \gamma.$$

Отсюда угол контакта, рад.:

$$\gamma = \arccos \frac{2R^2 - r^2}{2R^2}.$$

Тогда средняя длина дуги контакта

$$l_{k\text{ ср}} = R\gamma.$$

Расчет мощности механизма главного движения начинают с определения удельной силы резания F_{yd} , МПа, количественно равной значению удельной работы резания K , Дж/см³. Для поперечного пиления острыми круглыми пилами свежесрубленной древесины сосны значение удельной работы резания можно принять по табл. 1, 2.

Таблица 1 – Значения удельной работы резания
по данным К.Ф. Гороховского¹¹

Ширина пропила b , мм	Значения K , Дж/см ³ , при подаче на зуб S_z , мм						
	0,02	0,04	0,05	0,08	0,1	0,15	0,2
3,5	100	86	77	72	67	61	55
5,0	83	68	61	54	50	42	39
8,0	-	43	38	33	30	26	24

Таблица 2 – Значения удельной работы резания
по данным Ю. В. Шелгунова¹²

Ширина пропила b , мм	Значения K , Дж/см ³ , при подаче на зуб S_z , мм			
	0,1	0,2	0,3	0,4
5,0	34,3	26,5	23,5	22,6
8,0	29,4	22,6	20,6	19,6
12	25,5	19,6	17,6	16,6

По данным А.Л. Бершадского, после обработки экспериментальных результатов А.А Смирнова, для расчета удельной работы резания при поперечном пилении древесины сосны влажностью 15...20% и угле боковой заточки 65° предложено уравнение, Дж/см³:

$$K = \frac{7,7}{S_z^{0,15} b^{0,5}} \quad (6)$$

Наконец, значение удельной силы резания по обработанным данным ЦНИИМОД можно найти по формуле

¹¹ Гороховский, К.Ф. Основы технологических расчетов оборудования лесосечных и лесоскладских работ. Учебное пособие/ К.Ф. Гороховский, Н.В. Лифшиц. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 256 с.

¹² Шелгунов, Ю. В. Машины и оборудование лесозаготовок, лесосплава и лесного хозяйства. Учебник для вузов/ Ю.В. Шелгунов, Г.М. Кутуков, Г.П. Ильин.– М.: Леси, пром-сть, 1982,–520 с.

$$F_{y\partial} = a_n a_w \left(k + \frac{\alpha_p P}{S_z} \right), \quad (7)$$

где k – касательное давление древесины на переднюю грань зуба, МПа;

p – фиктивная сила резания, Н/мм;

α_p – коэффициент затупления зуба;

a_n, a_w – поправочные коэффициенты на породу и влажность соответственно.

Значения p и k при поперечном пилении древесины сосны приведены ниже:

$$\begin{aligned} & - p = 1 \text{ Н/мм;} \\ & - \text{значение } k, \text{ МПа: } k = 60,76 - 13,72b + (0,41 - 0,0059\gamma)\beta_1, \end{aligned} \quad (8)$$

где b – ширина пропила, мм; при поперечном пилении толщина срезаемого слоя $a = b$;

γ – передний угол, град;

β_1 – угол заточки боковой кромки (угол заострения измеряется в теле зуба).

Коэффициент затупления

$$\alpha_p = 1 + \left(1 + 0,1 \frac{k}{p} \right) \frac{\Delta_p}{\rho_o + 50}, \quad (9)$$

где Δ_p – величина затупления зубьев пилы, мкм;

ρ_o – величина радиуса закругления боковых режущих кромок зубьев восстановленных (острых), мкм; $\rho_o = 10$ мкм.

Из приведенных табл. 1 и 2 и формул (6), (7), (8) следует, что с увеличением подачи на зуб пилы и ширины пропила значение удельной работы резания убывает.

Проведем сопоставительный анализ значений удельной работы резания, принимаемой по выше предложенным способам. Для этого выполним расчет

значений удельной работы резания (или примем табличное значение) для ширины пропила $b=8,0$ мм, передний угол зуба $\gamma = 0^\circ$, угол боковой заточки зубьев $\beta_1 = 65^\circ$ и полученные данные сведем в табл. 3.

Данные табл. 3 позволяют сделать вывод, что значение удельной работы резания для расчета мощности при поперечной распиловке фанерных кряжей следует брать по табл. 1 или 2.

Таблица 3 – Значения удельной работы резания, полученные для сопоставительного анализа при $b = 8,0$ мм, пилы острые

Источник данных	Значения K , Дж/ см ³ , при подаче на зуб S_z , мм						
	0,02	0,04	0,05	0,08	0,1	0,15	0,2
По табл. 1	-	43	38	33	30	26	24
По табл. 2	-	-	-	-	29,4	-	22,6
$K = \frac{7,7}{S_z^{0,15} b^{0,5}}$	4,9	4,41	4,27	3,98	3,85	3,62	3,47
$F_{y\partial} = a_n a_w (k + \frac{\alpha_p p}{S_z})$	Формула справедлива при $b \leq 5,5$ мм; при больших значениях b величина k получается отрицательная по знаку						

Поскольку данные таблиц заметно отличаются, рекомендуется принимать средние расчетные значения удельной работы резания. Для этого табличные значения выражены графически (рис. 2), по ним построена средняя расчетная кривая, описанная математически с величиной достоверности аппроксимации $R^2 \approx 0,99$:

$$\begin{aligned}
 - b = 5 \text{ мм } K &= \frac{20,836}{S_z^{0,2898}}; \\
 - b = 8 \text{ мм } K &= \frac{13,315}{S_z^{0,3574}};
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$-b = 12 \text{ мм} \quad K = \frac{12,18}{S_z^{0,3137}}.$$

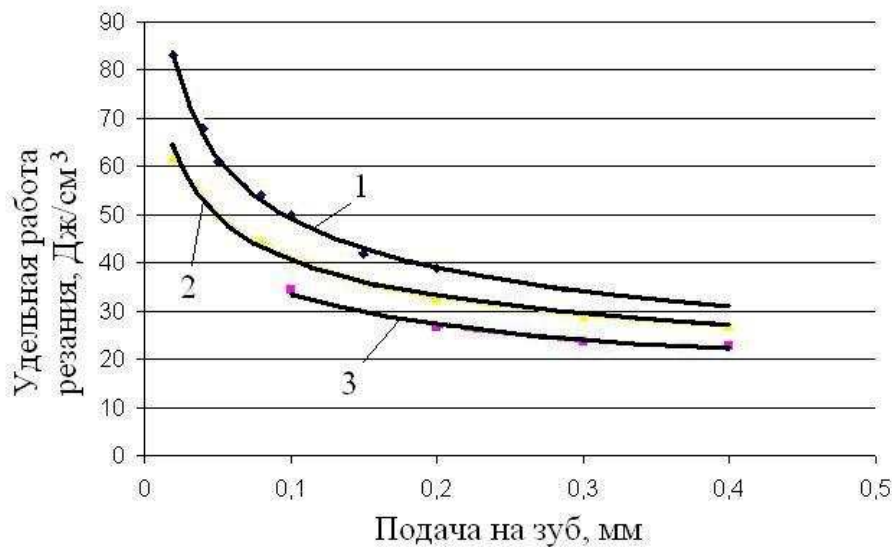


Рис. 2. График зависимости удельной работы резания при поперечном пилении от подачи на зуб при $b = 5$ мм:
1 – по данным Гороховского К.Ф.; 2 – среднее расчетное значение;
3 – по данным Шелгунова Ю.В.

Для определения величины коэффициента затупления по формуле (9) найдем значение k . Из выражения (7) для острой пилы получим для древесины сосны

$$k = K - \frac{P}{S_z}. \quad (11)$$

Для расчета мощности поперечного пиления предложены степенные формулы Грубе А.Э., Санева В.И., Ивановского Е.Г., эмпирические формулы А.Л. Бершадского, формулы, использующие табличные значения удельной силы резания, однако все они непригодны для решения данной задачи, так как составлены для условий отличающихся от условий раскрывки кряжей.

Мощность поперечного распиливания кряжа может быть найдена по объемной формуле, кВт:

$$P = \frac{Kv_1}{1000}, \quad (12)$$

где v_1 – секундный объем, образуемого пропила в кряже, $\text{см}^3/\text{с}$.

Объем пропила, см^3 :

$$v_n = \frac{\pi d_q^2}{4} b, \quad (13)$$

где d_q – диаметр чурака, см;

b – ширина пропила, см.

Цикл времени выполнения одного пропила, с:

$$t_y = \frac{0,06l}{V_s}, \quad (14)$$

где V_s – скорость подачи (скорость надвигания пилы на кряж), м/мин.

Секундный объем срезаемой древесины, $\text{см}^3/\text{с}$:

$$v_1 = \frac{v_n}{t_y}. \quad (15)$$

Пример. Дано: на круглопильном станке распиливаются березовые кряжи на чураки. Диаметр пилы $D = 1500$ мм, толщина ее диска $S = 5,5$ мм, количество зубьев $z = 72$ шт., уширение разведенных зубьев на сторону $S' = 1,5$ мм, частота вращения пильного вала 700 мин^{-1} . Диаметр отпиливаемых чураков $d_q = 52$ см, скорость подачи $V_s = 20$ м/мин.

Определить мощность механизма главного движения и силы резания.

Решение. 1. Находим значение ширины пропила

$$b = S + 2S' = 5,5 + 2 \cdot 1,5 = 8,5 \text{ мм}.$$

2. Скорость главного движения

$$V = \frac{\pi D n}{60000} = \frac{3,14 \cdot 1500 \cdot 700}{60000} = 55 \text{ м/с}.$$

3. Находим объем пропила по формуле:

$$v_n = \frac{\pi d_y^2}{4} b = \frac{3,14 \cdot 52^2}{4} \cdot 0,85 = 1804,2 \text{ см}^3.$$

4. Параметры раскряжевочной установки:

– длина маятника $L=1500$ мм;

– высота расположения верхней стойки маятника над конвейером

$$H = L + 0,5D - 10 = 1500 + 0,5 \cdot 1500 - 10 = 2240 \text{ мм}.$$

5. Угол поворота маятника при контакте зубьев пилы с древесиной кряжа:

– угол поворота маятника в момент врезания пилы в кряж

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \arccos\left(\frac{L^2 + (H - r)^2 - (R + r)^2}{2L(H - r)}\right) = \\ &= \arccos\left(\frac{1500^2 + (2240 - 260)^2 - (750 + 260)^2}{2 \cdot 1500 \cdot (2240 - 260)}\right) = 0,5131 \text{ рад.}; \end{aligned}$$

– угол поворота маятника в момент выхода пилы из кряжа

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= \arccos\left(\frac{L^2 + (H - r)^2 - (R - r)^2}{2L(H - r)}\right) = \\ &= \arccos\left(\frac{1500^2 + (2240 - 260)^2 - (750 - 260)^2}{2 \cdot 1500 \cdot (2240 - 260)}\right) = 0,2467 \text{ рад.}; \end{aligned}$$

– угол поворота маятника при пилении

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 0,5131 - 0,2467 = 0,2664 \text{ рад}.$$

6. Путь надвигания пилы

$$l = L\varphi = 1500 \cdot 0,2664 = 400 \text{ мм}.$$

7. Найдем время формирования пропила

$$t_y = \frac{0,06l}{V_s} = \frac{0,06 \cdot 400}{20} = 1,2 \text{ с}.$$

8. Определим секундный объем срезаемой стружки по формуле

$$v_1 = \frac{v_n}{t_y} = \frac{1804,2}{1,2} = 1503,5 \text{ см}^3/\text{с}.$$

9. Находим значение подачи на зуб

$$S_z = \frac{1000V_s}{zn} S_z = \frac{1000 \cdot 20}{72 \cdot 700} = 0,397 \text{ мм}.$$

10. Находим касательное давление древесины сосны на переднюю грань острого зуба (принимая значение K для ширины пропила $b = 8$ мм; значение $p = 1$ Н/мм):

$$k = K - \frac{p}{S_z} = \frac{13,315}{S_z^{0,3574}} - \frac{1}{S_z} = 16,0 \text{ МПа.}$$

11. Определим средний угол контакта пилы с кряжом, рад.:

$$\gamma = \arccos \frac{2R^2 - r^2}{2R^2} = \arccos \frac{2 \cdot 750^2 - 260^2}{2 \cdot 750^2} = 0,348 \text{ рад.}$$

12. Средняя длина дуги контакта пилы с кряжом

$$l_{\kappa \text{ ср}} = R\gamma = 750 \cdot 0,348 = 261,3 \text{ мм.}$$

13. Находим величину затупления зубьев пилы

$$\Delta_\rho = \frac{\gamma_\Delta l_{\kappa \text{ ср}} n}{1000} TK_n K_u = \frac{0,001 \cdot 261,3 \cdot 700}{1000} \cdot 180 \cdot 0,55 \cdot 0,8 = 14,5 \text{ мкм.}$$

14. Коэффициент затупления при начальном радиусе $\rho_o = 10$ мкм:

$$\alpha_\rho = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_\rho}{\rho_o + 50} = 1 + (1 + 0,1 \frac{16,0}{1,0}) \frac{14,5}{10 + 50} = 1,63.$$

15. Находим значение удельной работы резания для древесины березы при пилении затупленными зубьями пилы

$$K_\rho = a_n (k + \frac{\alpha_\rho p}{S_z}) = 1,25 \cdot (16,0 + \frac{1,63 \cdot 1}{0,397}) = 24,13 \text{ Дж/см}^3.$$

14. Находим мощность электродвигателя механизма главного движения при КПД передачи $\eta = 0,92$:

$$P = \frac{K_\rho v_1}{1000\eta} = \frac{24,13 \cdot 1503,5}{1000 \cdot 0,92} = 41,0 \text{ кВт.}$$

При скорости подачи $V_s = 3,6$ м/мин $P = 16,0$ кВт.

10. Средние силы резания:

$$\text{– касательная } F_x = \frac{1000 P \eta}{V} = \frac{1000 \cdot 41,0 \cdot 0,92}{55} = 686 \text{ Н;}$$

$$\text{– радиальная } F_z = (0,2 \dots 2,7) F_x = 686 \text{ Н.}$$

3. Дереворежущий инструмент

3.1. Период стойкости круглых пил и использование его в расчетах¹³ (Period of circular saws and resistance use it in calculations)

Для изготовления дереворежущих пил используются различные материалы: инструментальная легированная сталь 9ХФ, литые твердые сплавы – стеллиты ВЗКР, вольфрамокобальтовые сплавы ВК15. Режущие кромки зубьев пил при пилении затупляются и затупляются с различной степенью интенсивности в зависимости от режима пиления и, прежде всего, от пути, пройденным зубом по траектории резания в древесине, породы древесины, материала лезвий пилы, угла перерезания волокон древесины и др.

Степень затупления лезвий оценивается величиной радиуса закругления режущей кромки зуба ρ , измеряемого в мкм. При этом в период монотонного износа лезвия, радиус закругления режущей кромки находят так:

$$\rho = \rho_o + \gamma_{\Delta} L, \quad (1)$$

где ρ_o – величина радиуса закругления острого, восстановленного лезвия в начале монотонного износа, мкм; обычно для стальных пил принимают $\rho_o = 10$ мкм;

γ_{Δ} – величина затупления режущей кромки зуба на 1 м пути в заготовке, мкм/м;

L – путь лезвия в заготовке (равен сумме длин траекторий в заготовке), м.

$\gamma_{\Delta} L = \Delta \rho$ – прирост радиуса закругления за время работы, мкм.

¹³ Глебов И.Т. Период стойкости круглых пил и использование его в расчетах = Period of circular saws and resistance use it in calculations/ И.Т. Глебов. – «Леса России и хозяйство в них». – 2015. – №2(53). – С. 30-32.

Затупление режущих кромок зубьев вызывает ухудшение шероховатости и точности размеров пропиленных поверхностей и повышение мощности на пиление.

Предельно допустимое затупление зубьев принято оценивать периодом стойкости режущего инструмента. *Периодом стойкости называют время непрерывной работы зубьев пилы до наступления отказа, когда не обеспечивается получение заданной шероховатости стенок пропила или не обеспечивается получение нормативной точности пиломатериалов.*

Для стальных пил при продольном пилении хвойных пород древесины период стойкости составляет приблизительно 150...210 мин, а при пилении твердых лиственных пород – 150 мин. Период стойкости стеллитированных зубьев пил равен 420...480 мин, а оснащенных твердым вольфрамкобальтовым сплавом 840...960 мин. Приведенные данные никак не связаны с параметрами режима пиления и поэтому считаются приближенными.

Целью выполненной работы является получение результатов о периоде стойкости круглых пил зависящих от параметров режима пиления.

Для определения величины прироста затупления лезвий воспользуемся диаграммой затупления, приведенной в работе А.А. Соловьева.¹⁴ На диаграмме кривые монотонного затупления начинаются от $\rho_o = 5$ мкм и дают информацию для мягких и твердых пород древесины в зависимости от пути резания и угла встречи лезвия с волокнами древесины ϕ_e . Данные диаграммы сведены в табл.1.

Используя возможности Microsoft Office Excel, данные таблицы запишем в форме степенных формул (табл. 2).

¹⁴ Соловьев, А.А. Лабораторный практикум по резанию древесины. Учебное пособие/ А.А. Соловьев. – М.: МЛТИ, 1982. – 99 с.

Таблица 1 – Зависимость прироста радиуса закругления Δ_ρ при продольно-торцовом резании для мягких пород древесины от пути зуба в древесине L , км

L , км	10	20	30	40	50
Δ_ρ при $\varphi_\delta=0^\circ$	11	15	18	20	22
10°	11,5	16,0	19	21,3	32,2
20°	12	15,8	20	22,6	24,5
Δ_ρ при $\varphi_\delta=30^\circ$	12,5	17,5	21	24	25,5
40°	13	18,2	22	25	26,7
50°	13,5	18,9	23	26	27,9
Δ_ρ при $\varphi_\delta=60^\circ$	14	19,5	24	27	29
70°	14,4	20,3	24,8	27,8	30
80°	14,8	21,5	25,6	28,6	31
Δ_ρ при $\varphi_\delta=90^\circ$	15,2	22	26,5	29,5	32

Таблица 2 – Зависимость приращения радиуса закругления режущих кромок зубьев Δ_ρ , мкм, от пути зуба в заготовке L , км

$\varphi_\delta=0^\circ$	$\Delta_\rho = 4,1066L^{0,4307}$	$\varphi_\delta=50^\circ$	$\Delta_\rho = 4,7512L^{0,4584}$
$\varphi_\delta=10^\circ$	$\Delta_\rho = 4,2588L^{0,4366}$	$\varphi_\delta=60^\circ$	$\Delta_\rho = 4,889L^{0,4611}$
$\varphi_\delta=20^\circ$	$\Delta_\rho = 4,3533L^{0,4456}$	$\varphi_\delta=70^\circ$	$\Delta_\rho = 5,0356L^{0,4621}$
$\varphi_\delta=30^\circ$	$\Delta_\rho = 4,4779L^{0,4511}$	$\varphi_\delta=80^\circ$	$\Delta_\rho = 5,2537L^{0,4631}$
$\varphi_\delta=40^\circ$	$\Delta_\rho = 4,6142L^{0,4549}$	$\varphi_\delta=90^\circ$	$\Delta_\rho = 5,3318L^{0,4645}$

Обобщенная формула должна иметь вид $\Delta_\rho = mL^C$.

Данные по m и C сведем в табл. 3.

Таблица 3 – Значения коэффициентов m и C

φ°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
m	4,1066	4,2588	4,3533	4,4779	4,6142	4,7512	4,889	5,0356	5,2537	5,3318
C	0,4307	0,4366	0,4456	0,4511	0,4549	0,4584	0,4611	0,4621	0,4631	0,4645

Используя программу Microsoft Office Excel, получим после коррекции

$$m = 4,0861 + 0,0138\varphi_\phi;$$

$$C = 0,4305 + 0,0008\varphi_\phi - 5 \cdot 10^{-6} \varphi_\phi^2.$$

Обобщенная формула примет вид, мкм:

$$\Delta\rho = (4,0861 + 0,0138\varphi_\phi) L^{(0,4305 + 0,0008\varphi_\phi - 5 \cdot 10^{-6} \varphi_\phi^2)}, \quad (2)$$

где φ_ϕ – угол встречи, образованный вектором скорости главного движения и волокнами древесины, град;

При пилении угол перерезания волокон древесины чаще всего изменяется в диапазоне $\varphi = 30 \dots 60^\circ$. Формула (2) дает хорошую сходимость результатов расчета с данными табл. 1, погрешность составляет около 1,5%.

Для учета твердости породы древесины и материала зубьев пилы в формулу введем поправочные коэффициенты:

– a_∂ – твердости древесины: твердых пород древесины, $a_\partial = 0,8$; мягких пород древесины, $a_\partial = 1$;

– a_m – материала зуба пилы: для пил с зубьями из стали 9ХФ $a_m = 1$; для стеллитированных зубьев $a_m = 5$; для зубьев с напаянными пластинами сплава ВК15 $a_m = 25$.

Тогда формулу для определения пути зуба в древесине с учетом закономерностей его затупления запишем так, км:

$$L = a_{\partial} a_m \left(\frac{\Delta \rho}{4,0861 + 0,0138 \varphi} \right)^{\left(\frac{1}{(0,4305 + 0,0008 \varphi_s - 5 \cdot 10^{-6} \varphi_s^2)} \right)}. \quad (3)$$

При выполнении расчетов можно задаться значением приращения радиуса закругления зуба $\Delta \rho = 35 \dots 50$ мкм и по формуле (3) найти значение L .

Путь зуба пилы в заготовке можно определить путем сложения длин всех траекторий резания по формуле, км

$$L = 10^{-6} l_k n T K_n K_u, \quad (4)$$

где l_k – длина дуги контакта зубьев пилы с заготовкой, мм; $l_k = R \varphi_k$;

n – частота вращения пилы, мин^{-1} ;

T – время работы пилы к моменту выполнения расчетов (период стойкости), мин;

K_n , K_u – коэффициенты производительности и использования станка;

$K_n = 0,92$; $K_u = 0,95$.

Отсюда находится период стойкости пилы, мин:

$$T = \frac{L}{10^{-6} l_k n K_n K_u}. \quad (5)$$

Пример. Дано: на бревнопильном станке продольно распиливаются сосновые бревна круглой пилой из стали 9ХФ. Длина дуги контакта пилы с бревном $l_k = 200$ мм, частота вращения пилы $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$, угол подачи (средний угол на дуге контакта, равный острому углу перерезания волокон древесины φ_s) $\mu = \varphi_s = 61,8^\circ$.

Определить период стойкости пилы T .

Решение. 1. Находим путь зуба в древесине

$$\begin{aligned} L &= a_{\partial} a_m \left(\frac{\Delta \rho}{4,0861 + 0,0138 \varphi} \right)^{\left(\frac{1}{(0,4305 + 0,0008 \varphi_s - 5 \cdot 10^{-6} \varphi_s^2)} \right)} = \\ &= 1 \cdot 1 \cdot \left(\frac{35}{4,0861 + 0,0138 \cdot 61,8} \right)^{\frac{1}{(0,4305 + 0,0008 \cdot 61,8 - 5 \cdot 10^{-6} \cdot 61,8^2)}} = 70 \text{ км}. \end{aligned}$$

2. Находим период стойкости пилы

$$T = \frac{L}{10^{-6} l_k n K_n K_u} = \frac{70}{10^{-6} \cdot 200 \cdot 1000 \cdot 0,92 \cdot 0,95} = 400,5 \text{ мин.}$$

К концу рабочей восьмичасовой смены (480 мин) пила будет тупой, ее надо будет снять со станка и отдать на переточку.

Вывод. Предложенная методика определения периода стойкости пилы для продольного пиления древесины увязывает период стойкости с параметрами режима пиления (углом встречи зуба пилы с волокнами древесины, длиной пути зуба в древесине, материалом зуба пилы и твердостью древесины), что позволяет повысить точность прогнозирования момента наступления отказа по параметру затупления пилы.

3.2. Затупление зубьев дереворежущего инструмента¹⁵

(The blunting the wood-cutting teeth tool)

Для изготовления дереворежущего инструмента используются различные материалы: инструментальная углеродистая сталь, инструментальная легированная сталь, быстрорежущая сталь, твердые сплавы литьевые (сормайты и стеллиты), вольфрамокобальтовые (ВК15), минералокерамические ВСК60, синтетические сверхтвердые материалы на основе нитрида бора или поликристаллического алмаза. Режущие кромки лезвий режущего инструмента, выполненных из любого материала, затупляются и затупляются с различной степенью интенсивности при резании древесины различных пород и древесных материалов. При этом в технической литературе нет полной информации, позволяющей рассчитать степень затупления лезвий.

¹⁵ Глебов И.Т. Затупление зубьев дереворежущего инструмента = The blunting the wood-cutting teeth tool/ И.Т. Глебов, А.И. Шевченко. // Международный евразийский симпозиум: «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». – Екатеринбург, 2012. – С. 244-247.

Степень затупления лезвий оценивается величиной радиуса закругления режущей кромки зуба ρ , измеряемого в мкм. При этом на участке диаграммы монотонного износа лезвия, когда шероховатость рабочего участка лезвия близка к равновесной шероховатости, обеспечивающей минимальный коэффициент трения, радиус закругления режущей кромки находят так:

$$\rho = \rho_o + \gamma_{\Delta} L, \quad (1)$$

где ρ_o – величина радиуса закругления острого, восстановленного лезвия в начале монотонного износа, мкм; обычно для стального инструмента принимают $\rho_o = 10$ мкм для пил и $\rho_o = 8$ мкм для фрез;

γ_{Δ} – величина затупления режущей кромки зуба на 1 м пути в заготовке, мкм/м;

L – путь лезвия в заготовке (равен сумме длин траекторий в заготовке), м.

Найденная в технической литературе информация по степени затупления лезвий режущих инструментов и обработанная нами с целью приведения к единообразной форме, приведена в табл. 1.

Для приведения величины затупления лезвия к виду (1) поступим так.

Используем формулу коэффициента затупления

$$\alpha_{\rho} = 1 + (1 + 0,1 \frac{k}{p}) \frac{\Delta_{\rho}}{\rho_o + 50}, \quad (2)$$

где k – касательное давление срезаемого слоя на переднюю грань зуба, МПа;

p – фиктивная сила резания, Н/мм;

Δ_{ρ} – величина затупления лезвия к заданному моменту времени, мкм;

ρ_o – начальный радиус закругления острого лезвия, мкм.

Таблица 1 – Изменение радиуса закругления режущих кромок
от пути лезвий в обрабатываемой заготовке L , м

Вид резания	Материал режущего инструмента	Значение $\rho = \rho_o + \gamma_{\Delta}L$, мм	Примечание
Пиление рамными пилами	9ХФ	$\rho = 10 + 0,002L$	А.Л. Бершадский, древесина сосны ¹⁶
Пиление ленточными пилами	У10А	$\rho = 10 + 0,002L$	
	9ХФ	$\rho = 10 + 0,001L$	
	Стеллит ВЗКР	$\rho = 10 + 0,000143L$	
Пиление круглыми пилами продольное	9ХФ	$\rho = 10 + 0,001L$	А.Л. Бершадский
	Сталь быстрорежущая	$\rho = 10 + 0,0005L$	
	Стеллит ВЗКР	$\rho = 10 + 0,000143L$	
	Твердые сплавы ВК15	$\rho = 7,91 + 0,0004L$	А.И. Шевченко, УГЛТУ; древесина сосны $W = 75 \dots 80 \%$. $S_z = 0,2$ мм. $\gamma = 15^\circ$; $\alpha = 18^\circ$.
	ВК8	$\rho = 8,86 + 0,0003L$	
	ВК6	$\rho = 7,71 + 0,0003L$	
	ВК4	$\rho = 7,59 + 0,0002L$	
Пиление круглыми пилами поперечное бревен диаметром до 52 см	9ХФ	$\rho = 10 + (0,0022 - 0,0002T)L$, где T – время работы, $T = 0 \dots 4$ ч	Ю.В. Шелгунов, ¹⁷ древесина сосны $W = 60\%$
Фрезерование цилиндрическое	8Х6НФТ, Х6ВФ	$\rho = 5 + 0,0008L$	А.Л. Бершадский, древесина сосны
	Твердые сплавы ВК15	$\rho = 10 + 0,00008L$	Древесина сосны
	Твердые сплавы ВК15	$\rho = 10 + 0,00035L$	С.А. Гриневич, ¹⁸ обработка кромок фанеры хвостовой фрезой
	Сталь DS, аналог 9Х8НФТ	$\rho = 7 + 0,0004L$ при $t=2,9$ мм	А.Р. Абдулов, ¹⁹ древесина сосны, $W=6 \dots 12\%$
		$\rho = 7 + 0,0007L$ при $t=1,1$ мм	

Примечание. 1. Данные А.И. Шевченко по твердосплавному инструменту получены при продольном пилении со скоростью главного движения $V = 51,5$ м/с; подача на один зуб $S_z = 0,2$ мм; угловые параметры зуба $\gamma = 15^\circ$; $\alpha = 18^\circ$; влажность древесины сосны $W = 75 \dots 80$ %.

2. Данные Абдулова А.Р. получены при фрезеровании древесины сухой сосны на четырехстороннем продольнофрезерном станке со скоростью подачи $V_s = 14$ м/мин, подачей на зуб $S_z = 0,58$ мм, скорости главного движения 41,68 м/с.

Некоторые исследователи характеризуют степень затупления лезвий коэффициентом затупления α_p , величину которого приводят в зависимости от времени работы резца T (табл. 2).

Таблица 2 – Зависимость коэффициента затупления зубьев пилы для поперечной распиловки бревен от продолжительности ее работы

T , ч	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
α_p	1	1,2	1,4	1,55	1,7	1,8	1,9	1,95	2,0

При поперечном пилении бревен диаметром 52 см круглой пилой диаметром 1500 мм при ширине пропила $b = 12$ мм, подаче на зуб $S_z = 0,3$ мм и частоте вращения пилы 700 мин^{-1} , $p = 1$ Н/мм получим

$$k = K - \frac{p}{S_z} = \frac{12,18}{S_z^{0,3137}} - \frac{1}{S_z} = \frac{12,18}{0,3^{0,3137}} - \frac{1}{0,3} = 14,436 \text{ МПа}.$$

¹⁶ Бершадский, А.Л. Резание древесины/ А.Л. Бершадский, Н.И. Цветкова. – Минск: Высшейш. шк., 1975. – 304 с.

¹⁷ Шелгунов, Ю. В. Машины и оборудование лесозаготовок, лесосплава и лесного хозяйства. Учебник для вузов/ Ю.В. Шелгунов, Г.М. Кутуков, Г.П. Ильин.– М.: Лесн. пром-сть, 1982,—520 с.

¹⁸ Гриневич, С.А. Разработка режимов цилиндрического фрезерования кромок фанеры общего назначения/С.А. Гриневич//Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Минск, 2005.

¹⁹ Абдулов, А.Р. Исследование износостойкости стальных ножей упрочненных путем имплантации ионов азота/ А.Р. Абдулов, В.Г. Новоселов//Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Труды VI международного Евразийского симпозиума. – Екатеринбург, 2011.

Из формулы (2)

$$\Delta_{\rho} = \frac{(10 + 50)(\alpha_{\rho} - 1)}{1 + 0,1 \frac{14,436}{1}} = 24,59(\alpha_{\rho} - 1) \text{ мкм.}$$

Величина затупления лезвия на 1 м пути в заготовке при средней длине дуги контакта пилы с бревном $l = 261,3$ мм:

$$\gamma_{\Delta} = \frac{1000\Delta_{\rho}}{n l T K_n K_u} = \frac{1000 \cdot 24,59}{700 \cdot 261,3 \cdot T \cdot 0,55 \cdot 0,8} \text{ мкм/м}$$

Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Таблица 3 – Зависимость величины затупления зубьев
от времени работы пилы

$T, \text{ ч}$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
α_{ρ}	1	1,2	1,4	1,55	1,7	1,8	1,9	1,95	2,0
Δ_{ρ}	0	4,91	9,84	13,53	17,21	19,67	22,13	23,36	24,59
γ_{Δ}	-	0,002	0,002	0,0018	0,0018	0,0016	0,0015	0,0013	0,0012

Взаимосвязь величины затупления зуба пилы Δ_{ρ} и времени ее работы T может быть описана уравнением:

$$\gamma_{\Delta} = 0,0022 - 0,0002T.$$

Тогда по формуле (1) получим

$$\rho = 10 + (0,0022 - 0,0002T)L.$$

3.3. Проектирование сборной фрезы²⁰ (Designing of the modular mill)

Для установки ножей в сборных фрезах и ножевых валах часто используют клиновое крепление. Сборная фреза состоит из корпуса 1 (рис. 1) с посадочным отверстием и пазами, в которые вставлены ножи 2, клинья 4 с винтами 3. Винтами 3 обеспечивают монтажное крепление ножей.

Возникающие при вращении фрезы центробежные силы стремятся вырвать нож из паза. Этому препятствуют силы трения. Причем, чем больше центробежные силы, тем больше силы трения.

Методика определения монтажного усилия Q , создаваемого винтами, известна. Остается неясной, какова должна быть масса ножа и клина в механизме крепления.

При вращении фрезы на клин и нож действуют центробежные силы C_k и C_n , приложенные в центрах масс клина и ножа, расположенных на радиусах r_k и r_n .

Центробежные силы равны, Н:

$$C_k = \frac{m_k V_k^2}{r_k}; \quad C_n = \frac{m_n V_n^2}{r_n},$$

где m и V – масса, кг, и окружная скорость, м/с, центра массы клина и ножа соответственно.

Найдем проекции действующих сил на оси координат X и Y , если ось Y параллельна передней грани ножа.

²⁰ Глебов, И. Т. Проектирование сборной фрезы = Designing of the modular mill / И. Т. Глебов // Международный евразийский симпозиум: «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века». – Екатеринбург, 2010. – С. 201–205.

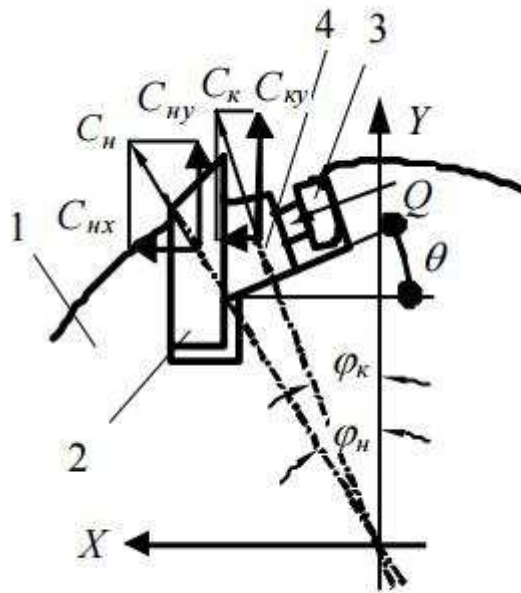


Рис. 1. Схема к расчету клинового крепления ножа

$$C_{kx} = \frac{m_k V_k^2}{r_k} \sin \varphi_k; \quad C_{hx} = \frac{m_h V_h^2}{r_h} \sin \varphi_h, \quad Q_x = Q \cos \theta \quad (1)$$

$$C_{hy} = \frac{m_h V_h^2}{r_h} \cos \varphi_h. \quad (2)$$

Под действием силы C_{hy} нож стремится вылететь из паза корпуса. Этому препятствуют силы трения ножа по стенке паза и по поверхности клина.

При коэффициенте трения f ($f = 0,12 \dots 0,18$) и коэффициенте запаса a ($a = 1,5 \dots 2$) условие равновесия ножа можно записать так:

$$C_{hy} = \frac{f}{a} (C_{hx} + 2C_{kx} + 2Q_x) \quad (3)$$

С учетом уравнений (1), (2) получим

$$m_h = \frac{2fr_h}{r_k V_h^2 (\alpha \cos \varphi_h - f \sin \varphi_h)} (m_k V_k^2 \sin \varphi_k + Q r_k \cos \theta). \quad (4)$$

где r_h , r_k – радиусы центров масс ножа и клина соответственно, м.

Угол действия центробежной силы ножа φ_H зависит от величины переднего угла γ и ширины ножа b (рис. 2).

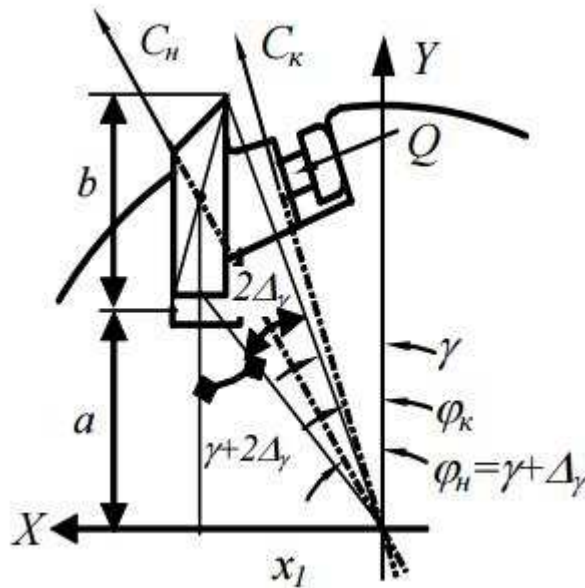


Рис. 2. – Схема к расчету радиуса центра тяжести ножа и угловых параметров

Из рисунка следует:

$$x_1 = r \sin \gamma, \quad (5)$$

где r – радиус окружности резания фрезы, мм;

$$a + b = r \cos \gamma;$$

$$a = r \cos \gamma - b; \quad (6)$$

$$a = r_H \cos(\gamma + \Delta\gamma). \quad (7)$$

Из (6) и (7) найдем радиус r_H центра тяжести ножа:

$$r_H = \frac{r \cos \gamma - b}{\cos(\gamma + \Delta\gamma)}, \quad (8)$$

где $\Delta\gamma$ – приращение переднего угла на середине ширины ножа;

$$x_1 = \arctg(\gamma + 2\Delta\gamma) = (r \cos \gamma - b) \tg(\gamma + 2\Delta\gamma). \quad (9)$$

Из (5) и (9) получим

$$\Delta\gamma = 0,5[\arctg(\frac{r \sin \gamma}{r \cos \gamma - b}) - \gamma]. \quad (10)$$

$$\varphi_n = \gamma + \Delta\gamma. \quad (11)$$

Проведем анализ уравнения (4) на примере.

Дано. Диаметр сборной фрезы $D = 180$ мм, ширина – 170 мм. Частота вращения $n = 6000$ мин⁻¹; угол клина $q = 20^\circ$. Углы действия центробежной силы и радиусы центра масс клина и ножа соответственно $\varphi_k = 29^\circ$, $r_k = 73$ мм; φ_n и r_n находятся по выражениям (11) и (8). Монтажный зажим ножей двумя винтами $Q = 7600$ Н.

Задаваясь произвольно массой клина ($m_k = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ кг) при ширине ножа $b = 40$ мм, а также изменяя величину переднего угла ($\gamma = 20^\circ; 25^\circ; 30^\circ$) по уравнению (4) найдем необходимую для надежного крепления массу ножа. Результаты расчета приведены на рис. 3.

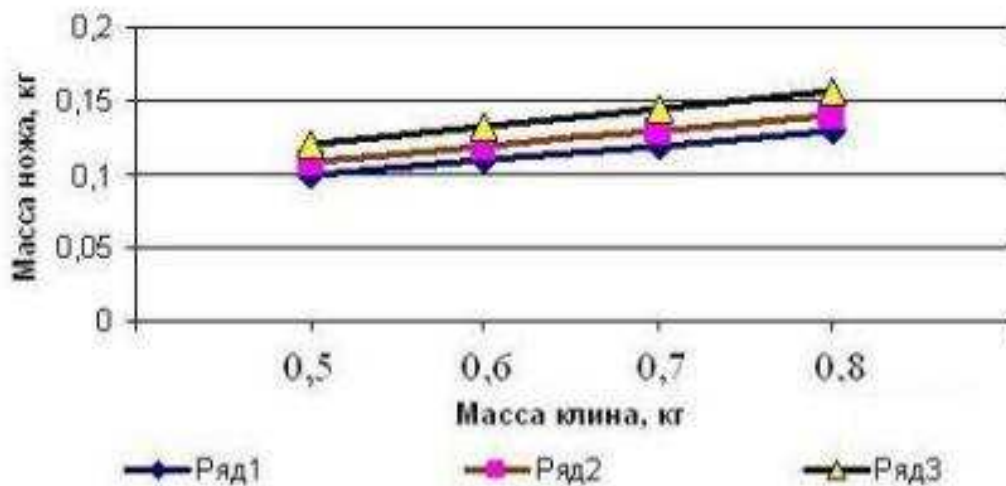


Рис. 3. Зависимость массы ножа от массы клина и переднего угла лезвия:

ряд 1 – $\gamma=20^\circ$; ряд 2 – $\gamma=25^\circ$; ряд 3 – $\gamma=30^\circ$

Если монтажное усилие на винтах уменьшить от 7600 Н до нуля, то допустимая масса ножа уменьшается для заданной массы клина в 2,02; 1,85; 1,73; 1,64 раза и может быть равной соответственно 0,0493; 0,0592; 0,0690; 0,0789 кг. Если ширину ножа уменьшить с 40 мм до 20 мм при $\gamma = 20^\circ$ и монтажном усилии $Q = 7600$ Н, то допустимая масса ножа уменьшается в 1,28 раза.

На рис. 4 показана зависимость отношения $\frac{m_K}{m_H}$ от массы клина фрезы при переднем угле $\gamma = 20^\circ$. Зависимость линейная. Ее уравнение $\frac{m_K}{m_H} = 3,1 + 3,9m_K$. Отсюда

$$m_H = \frac{m_K}{3,1 + 3,9m_K}. \quad (12)$$

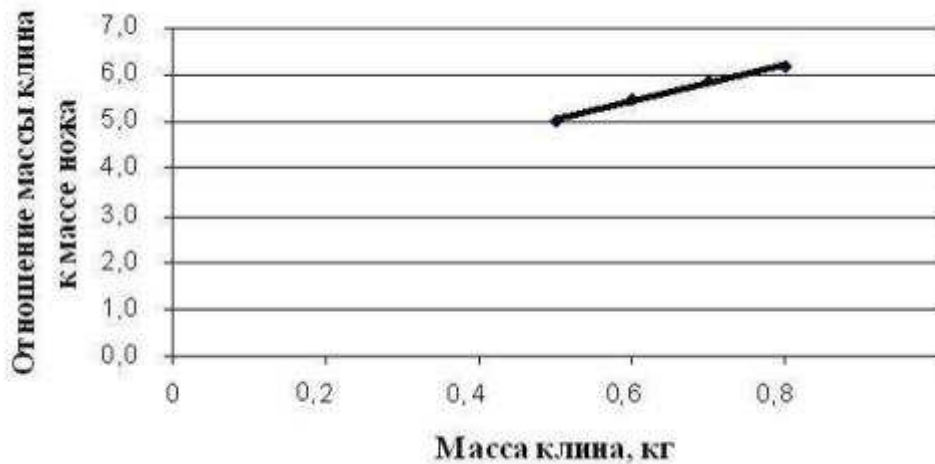


Рис. 4. Зависимость отношения m_K / m_H от массы клина

Если масса клина равна $m_K = 0,5$ кг, то должно быть $m_H = 0,099$ кг.

Для фрезы с передним углом $\gamma = 30^\circ$

$$\frac{m_K}{m_H} = 2,6 + 3,2m_K.$$

$$m_H = \frac{m_K}{2,6 + 3,2m_K}. \quad (13)$$

Таким образом, при проектировании цилиндрической сборной фрезы масса ножа должна подбираться по формуле (12) и (13).

Заключение

Статьи автора, приведенные в работе, являются базовыми, формирующими представление автора о современной теории резания древесины, ее расчетном методе, точности получаемых размеров и шероховатости обработанных поверхностей. Эти статьи нашли применение в учебном пособии «Резание древесины»²¹.

Подводя итог, можно отметить, что автору удалось решить следующие вопросы теории резания.

1. Получено точное уравнение параболы, описывающей зависимость касательной силы резания в диапазоне тонких срезаемых слоев:

$$F_{x1} = (p + 0,1k)(1 - \frac{1}{\lambda}a^2 + \frac{0,2}{\lambda}a - \frac{0,01}{\lambda}),$$

где λ – коэффициент: $\lambda = \rho^2 + 0,2\rho + 0,01$; где ρ – радиус закругления режущей кромки лезвия, мм.

2. Получено уравнение для расчета касательной силы резания по задней поверхности лезвия

$$F_{x13} = (p + 0,1k)(\frac{\rho_o}{\rho_o + 50}).$$

3. Получено уравнение для расчета коэффициента затупления режущей кромки лезвия

$$\alpha_\rho = 1 + (1 + 0,1\frac{k}{p})\frac{\Delta\rho}{\rho_o + 50}.$$

4. Решен вопрос о взаимосвязи и взаимозависимости сил резания, действующих по передней и задней граням лезвия. Эта взаимосвязь видна в уравнении коэффициента затупления.

5. Граничная абсцисса между тонкими и толстыми срезаемыми слоями не всегда проходит через точку $X = 0,1$ мм. Она может проходить и через точку $X = 0,07$ мм, например при резании фанеры.

²¹ Глебов И.Т. Резание древесины/ И.Т. Глебов. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. 308 с.

6. Получено уравнение для расчета допустимой подачи на зуб при цилиндрическом фрезеровании по величине глубины неровностей и погрешности установки лезвий:

$$S_z = \sqrt{y(2R - y)} + \sqrt{y(2R - y) - \Delta(2R - \Delta)}.$$

7. Доказано, что предельно допустимое значение радиуса закругления режущей кромки в момент отказа станка по параметру «точность»

$$\rho_{\max} = \frac{d}{e - \varepsilon_o} + \rho_o,$$

где
$$e = \frac{\sin(\alpha + \beta / 2)}{\sin(\beta / 2)};$$

d – величина укорочения радиуса фрезы при затуплении лезвий, мкм.